

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA QUE
UTILIZA O PRÓPRIO ARCO COMO SENSOR**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

AFRÂNIO REBOUÇAS COSTA FILHO

Florianópolis, fevereiro de 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SEGUIMENTO DE
JUNTA QUE UTILIZA O PRÓPRIO ARCO COMO SENSOR

AFRÂNIO REBOUÇAS COSTA FILHO

Esta tese ou dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Dr.Eng. Jair Carlos Dutra - Orientador

Prof. Dr. José Antônio Bellini da Cunha Neto - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Marco Antônio Martins Cavaco - Presidente

Prof. Dr. Eng. Carlos Enrique Niño Bohórquez

Dr. Eng. Alexandre Meirelles Pope (PETROBRAS/CENPES)

**“Se pude enxergar mais longe,
foi porque me apoiei em ombros de gigantes.”**

Isaac Newton

**Aos meus pais e
à minha esposa Lia.**

AGRADECIMENTOS

Expresso os meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho:

- Aos meus pais e aos meus irmãos e irmãs que sempre me apoiaram e me proporcionaram um ambiente familiar de amor e carinho.
- À minha esposa Lia pela compreensão e pelo amor incondicional que sempre estiveram presentes durante todos os dias, principalmente nos mais difíceis, de confecção desse trabalho.
- Ao prof. Jair Carlos Dutra, não só pela orientação técnica, mas também pela oportunidade de participar de um grupo tão competente e amigo;
- Ao Eng. Raul, pelo apoio constante na solução de diversos problemas enfrentados no decorrer do trabalho;
- Ao Eng. Carlos Baixo, pelo apoio e paciência no esclarecimento das dúvidas;
- Ao Eng. Moises, pela ajuda prestada no decorrer do trabalho;
- Aos amigos do peito Paulo Marcelo, Virgílio Porto e Leon Bandeira.
- Aos novos amigos feitos no LABSOLDA: Víctor Vergara, Jean Pimenta, Fabrício Freire e Túlio dos Santos, os quais proporcionaram um ambiente de trabalho amigável e companheiro;
- Aos amigos que conviveram comigo durante o tempo de desenvolvimento desse trabalho: Públio Duarte, Tiago Pereira, Hilbeth Azikri, Alexandre Abreu, Francisco Frederico, César Vinadé, entre outros.
- Aos profs. Augusto Buschinelli, Niño e Cleide, pelo tratamento amigável e pela orientação;
- Aos profs. Clóvis Raimundo Maliska, Axel Dihlmann e à ANP (Agência Nacional do Petróleo) pelo financiamento desse trabalho através de bolsa de pesquisa e compra do material necessário ao seu desenvolvimento;
- A todos os bolsistas que contribuíram para esse trabalho, em especial: Diego e Paulo Roberto Armanini.
- A todos os funcionários do LABSOLDA: Denise, Jean, Valério, Tiago, Marcus e Pablo, que sempre ajudaram como possível;
- Ao Eng. Larry Ollé, pelo companheirismo e pela sempre prontidão no esclarecimento de quaisquer dúvidas. (*In Memoriam*)

SUMÁRIO

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <u>LISTA DE FIGURAS</u> | <u>VIII</u> |
| <u>LISTA DE TABELAS</u> | <u>XII</u> |
| <u>SIMBOLOGIA</u> | <u>XIII</u> |
| <u>RESUMO</u> | <u>XIV</u> |
| <u>ABSTRACT</u> | <u>XV</u> |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | <u>1</u> |
| 1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS | 1 |
| <u>CAPÍTULO 2 - RESUMO DAS INFORMAÇÕES DA LITERATURA</u> | <u>4</u> |
| 2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE APLICAÇÃO DA SOLDAGEM | 4 |
| 2.2 ESTADO DA ARTE DOS SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA | 5 |
| 2.2.1 SENSORES DE CONTATO (TÁTEIS) | 6 |
| 2.2.2 SENSORES REMOTOS | 8 |
| 2.3 SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA QUE UTILIZAM O PRÓPRIO ARCO VOLTAICO COMO SENSOR (“SENSOR DE ARCO”) | 9 |
| 2.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 9 |
| 2.3.2 MÉTODOS DE IMPLEMENTAÇÃO | 14 |
| <u>CAPÍTULO 3 - O SISTEMA MECÂNICO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA – “TARTÍLOPE-V2”</u> | <u>18</u> |
| 3.1 SISTEMA MECÂNICO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA EM UM EIXO – “SDP-600”, “SDP- MP” E “TARTÍLOPE-V1” | 18 |
| 3.2 SISTEMA MECÂNICO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA EM DOIS EIXOS - “TARTÍLOPE-V2” | 21 |
| <u>CAPÍTULO 4 - MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL</u> | <u>27</u> |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 4.1 FONTE DE SOLDAGEM ‘INVERSAL -300’ | 27 |
| 4.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DAS VARIÁVEIS ELÉTRICAS DE SOLDAGEM | 29 |
| 4.3 BANCADA DE DESENVOLVIMENTO | 30 |
| 4.4 BANCADA DE AVALIAÇÃO | 32 |
| <u>CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS</u> | <u>34</u> |
| 5.1 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE | 34 |
| 5.1.1 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA PRINCIPAL DO ALGORITMO DE CONTROLE | 34 |
| 5.1.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 35 |
| 5.2 MÉTODOS EMPREGADOS NA DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE SEGUIMENTO PROPOSTO E NO ESTUDO DO EFEITO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO SEU FUNCIONAMENTO | 41 |
| 5.3 ENSAIOS DE COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA DESENVOLVIDO E UM SISTEMA COMERCIAL | 44 |
| 5.4 MÉTODOS EMPREGADOS NA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA NA SOLDAGEM DE JUNTAS CHANFRADAS | 46 |
| <u>CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u> | <u>49</u> |
| 6.1 DETERMINAÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE | 49 |
| 6.2 ESTUDO DO EFEITO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA DESENVOLVIDO | 60 |
| 6.3 COMPARAÇÃO ENTRE O SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA DESENVOLVIDO E UM SISTEMA COMERCIAL | 85 |
| 6.4 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE SEGUIMENTO DE JUNTA NA SOLDAGEM DE JUNTAS CHANFRADAS | 90 |
| <u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES</u> | <u>92</u> |
| <u>CAPÍTULO 8 - PROPOSTA PARA NOVOS TRABALHOS</u> | <u>94</u> |
| <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | <u>95</u> |
| <u>ANEXO A</u> | <u>97</u> |

ANEXO B**98**

ANEXO C**100**

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Métodos de aplicação da solda e seus respectivos “ciclos de trabalho”, em porcentagem (adaptado de Carry, 1995). | 2 |
| Figura 2.1 – Sistema esfera-mola utilizado para o controle da altura da pistola (Gullco, 1999). | 7 |
| Figura 2.2 – Sistema de seguimento de junta com sonda de contato (Gullco, 1999)..... | 7 |
| Figura 2.3 - Sistema de seguimento de junta com tecnologia LASER (Metatech, 2000)..... | 9 |
| Figura 2.4 – Desenho esquemático de uma tocha MIG/MAG mostrando a variação no comprimento do eletrodo com a DBCP. | 10 |
| Figura 2.5 – Variação do comprimento do eletrodo com o movimento de tecimento da tocha de soldagem: (a) – extremidade esquerda; (b) – centro; (c) – extremidade direita. | 11 |
| Figura 2.6 – Padrões de tecimento. | 11 |
| Figura 2.7 – Oscilograma da corrente média de uma solda realizada com tecimento numa junta em “V”..... | 12 |
| Figura 2.8 – Exemplo de como o sinal da corrente de soldagem pode ser utilizado para verificar o posicionamento da tocha de soldagem. (a) – Posição Centralizada, (b) – Posição Descentralizada. | 13 |
| Figura 2.9 – Primeiro Sistema de Seguimento de Junta proposto por Kim e Na (1991a e b).. | 15 |
| Figura 2.10 – Segundo Sistema de Seguimento de Junta proposto por Kim e Na (1991c). | 16 |
| Figura 3.1 – Sistema de Deslocamento e Posicionamento – “SDP-MP”..... | 18 |
| Figura 3.2 – Esquema do sistema mecânico de movimentação da tocha utilizado no “SDP”. .. | 19 |
| Figura 3.3 – Sistema mecânico de deslocamento da tocha em um eixo – “Tartílope-V1” | 20 |
| Figura 3.4 – Primeiro protótipo do sistema mecânico de deslocamento em dois eixos..... | 21 |
| Figura 3.5 – Primeira versão do “Tartílope-V2” que apresenta os dispositivos de movimentação dos dois eixos embutidos num único gabinete..... | 22 |
| Figura 3.6 – Segunda versão do “Tartílope-V2” onde foi realizada uma primeira otimização na disposição dos dispositivos de movimentação dos eixos. | 22 |
| Figura 3.7 – Re-projeto do sistema mecânico do “Tartílope-V2”..... | 23 |
| Figura 3.8 – Sistema de fixação do braço Y..... | 24 |
| Figura 3.9 – Problema causado pela má fixação do rolete superior. | 25 |
| Figura 3.10 – Nova concepção do sistema de fixação do braço transversal. | 25 |
| Figura 3.11 – Projeto final do “Tartílope-V2”. | 26 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 – Diagrama de funcionamento simplificado de uma fonte chaveada no secundário (Gohr Jr., R., 2002). | 28 |
| Figura 4.2 – Diagrama esquemático da fonte Inversal-300 (Gohr Jr., R., 2002). | 28 |
| Figura 4.3 – Sistema de medição INTERDATA-TC-1. | 30 |
| Figura 4.4 – Disposição dos equipamentos utilizados na ‘Bancada de Desenvolvimento’. | 30 |
| Figura 4.5 – Diagrama dos principais módulos da ‘Bancada de Desenvolvimento’ e o fluxo de informações entre eles. | 32 |
| Figura 4.6 – Disposição dos equipamentos utilizados na ‘Bancada de Avaliação’. | 33 |
| Figura 5.1 – Algoritmo de controle geral dos sistemas de seguimento de junta guiados pelo arco. | 34 |
| Figura 5.2 – Desenho esquemático da configuração da bancada experimental utilizada para os testes de funcionalidade dos algoritmos de controle. | 36 |
| Figura 5.3 – Algoritmo I | 37 |
| Figura 5.4 – Algoritmo II | 38 |
| Figura 5.5 – Algoritmo III | 39 |
| Figura 5.6 – Corpo-de-prova utilizado na comprovação da eficiência do algoritmo de controle. | 40 |
| Figura 5.7 – Configuração dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de aplicação do sistema de seguimento de junta na soldagem de juntas chanfradas em ‘V’. | 46 |
| Figura 5.8 – Posição inicial (a) e final (b) da tocha antes do ensaio ser realizado. | 47 |
| Figura 6.1 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio ‘IA’ de definição do algoritmo. | 50 |
| Figura 6.2 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio ‘IB’ de definição do algoritmo. | 51 |
| Figura 6.3 – Oscilograma da corrente de soldagem mostrando o que ocorre com o sinal da corrente média durante a ocorrência de uma instabilidade no processo (ensaio ‘IB’). | 52 |
| Figura 6.4 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio ‘IIA’ de definição do algoritmo. | 53 |
| Figura 6.5 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio ‘IIB’ de definição do algoritmo. | 54 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6.6 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IIIA” de definição do algoritmo..... | 56 |
| Figura 6.7 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IIIB” de definição do algoritmo..... | 57 |
| Figura 6.8 – Versão final do algoritmo de controle do sistema. (Ie – corrente média esquerda, Id – corrente média direita, De(n) – enésimo desvio calculado)..... | 58 |
| Figura 6.9 – Resultados dos ensaios de eficiência do algoritmo de controle..... | 59 |
| Figura 6.10 – Ensaio de referência para o modo de transferência por curto-circuito (V25C, F15C, A80C e D100C)..... | 60 |
| Figura 6.11 – Ensaio de referência para o modo de transferência goticular axial (V42G, F15G, A60G e D100G). | 61 |
| Figura 6.12 – Oscilograma da corrente para a soldagem com tecimento no modo de transferência por curto-circuito. | 62 |
| Figura 6.13 – Oscilograma da corrente para a soldagem com tecimento no modo de transferência goticular axial. | 62 |
| Figura 6.14 – Resultado do ensaio V17C (transferência por curto-circuito). | 63 |
| Figura 6.15 – Resultado do ensaio V33G (transferência goticular axial)..... | 64 |
| Figura 6.16 – Oscilograma da corrente de soldagem para o ensaio V17C (transferência por curto-circuito)..... | 65 |
| Figura 6.17 – Resultado do ensaio V33C (transferência por curto-circuito). | 66 |
| Figura 6.18 – Resultado do Ensaio V50G (transferência goticular axial)..... | 67 |
| Figura 6.19 – Resultado do ensaio F10C (transferência por curto-circuito)..... | 68 |
| Figura 6.20 – Resultado do ensaio F10G (transferência goticular axial)..... | 69 |
| Figura 6.21 – Resultado do ensaio F20C (transferência por curto-circuito)..... | 70 |
| Figura 6.22 - Resultado do ensaio F20G (transferência goticular axial)..... | 71 |
| Figura 6.23 – Resultado do ensaio A60C (transferência por curto-circuito). | 72 |
| Figura 6.24- Resultado do ensaio A40C (transferência por curto-circuito)..... | 73 |
| Figura 6.25 – Resultado do ensaio A40G (transferência goticular axial). | 74 |
| Figura 6.26 – Resultado do ensaio A20G (transferência goticular axial). | 75 |
| Figura 6.27 – Resultado do ensaio D25C (transferência por curto-circuito). | 76 |
| Figura 6.28 - Resultado do ensaio D25G (transferência goticular axial)..... | 77 |
| Figura 6.29 – Resultado do ensaio D50C (transferência por curto-circuito). | 78 |
| Figura 6.30 - Resultado do ensaio D50G (transferência goticular axial)..... | 79 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.31 - Resultado do ensaio D150C (transferência por curto-circuito)..... | 80 |
| Figura 6.32 - Resultado do ensaio D150G (transferência goticular axial). | 81 |
| Figura 6.33 - Resultado do ensaio D00C (transferência por curto-circuito)..... | 82 |
| Figura 6.34 - Resultado do ensaio D00G (transferência goticular axial). | 83 |
| Figura 6.35 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem para os desvios de 2,5° (a) e 15° (b)..... | 87 |
| Figura 6.36 – Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem referentes ao ensaio COMP6. | 88 |
| Figura 6.37 – Solda de topo realizada numa junta chanfrada em V propositalmente posicionada com desvio de 5° (ensaio II)..... | 90 |
| Figura 6.38 – Solda de topo realizada numa junta chanfrada em V propositalmente posicionada com desvio de 5° (ensaio III)..... | 91 |
| Figura A.1 - Classificação dos níveis de automação da soldagem (adaptado de Malin, 1985). | 97 |
| Figura B.1 - Aspecto visual do cordão de solda para o ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,08 \text{ mm/A}$ | 98 |
| Figura B.2 - Replica do ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,08$ mm/A | 98 |
| Figura B.3 - Aspecto visual do cordão de solda para o ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,1 \text{ mm/A}$ | 98 |
| Figura B.4 - Replica do ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,1$ mm/A | 99 |
| Figura C.1 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP1. | 100 |
| Figura C.2 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP2. | 100 |
| Figura C.3 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP3. | 100 |
| Figura C.4 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP4. | 100 |
| Figura C.5 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP5. | 101 |
| Figura C.6 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP6. | 101 |
| Figura C.7 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP7. | 101 |
| Figura C.8 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP8. | 101 |
| Figura C.9 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP9. | 102 |
| Figura C.10 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP10. | 102 |
| Figura C.11 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP11. | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 – Tipos de sensores utilizados nos sistemas de seguimento de junta. | 6 |
| Tabela 2.2 - Diferentes métodos de implementação dos Sistemas de Seguimento de Junta que utilizam o arco voltaico como sensor. | 14 |
| Tabela 4.1 – Dados técnicos da fonte de soldagem “Inversal -300”. | 28 |
| Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem empregados nos ensaios de determinação do algoritmo de controle | 35 |
| Tabela 5.2 – Codificação dos ensaios de determinação do algoritmo de controle..... | 40 |
| Tabela 5.3 – Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios de determinação da faixa de operação do sistema..... | 41 |
| Tabela 5.4 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência por curto-circuito, utilizado na determinação da faixa de operação do sistema..... | 42 |
| Tabela 5.5 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência goticular axial, utilizado na determinação da faixa de operação do sistema..... | 43 |
| Tabela 5.6 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência por curto-circuito, utilizado na comparação dos sistemas..... | 44 |
| Tabela 5.7 - Projeto dos experimentos, para o modo de transferência goticular axial, utilizado na comparação dos sistemas..... | 45 |
| Tabela 5.8 – Parâmetros de soldagem empregados no ensaio JII | 48 |
| Tabela 6.1 – Resultados finais obtidos nos ensaios realizados no modo de transferência por curto-circuito. | 84 |
| Tabela 6.2 – Resultados finais obtidos nos ensaios realizados no modo de transferência goticular axial. | 85 |
| Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios realizados na “Bancada de Avaliação” para o modo de transferência por curto circuito..... | 86 |
| Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios realizados na “Bancada de Avaliação” para o modo de transferência goticular axial. | 88 |

SIMBOLOGIA

ALFABETO LATINO:

| | | |
|----------------|--------------------------------------|--------------|
| DBCP | Distância Bico-de-Contato Peça | [m] |
| Le | Comprimento do Eletrodo | [m] |
| T | Período de Tecimento | [s] |
| f | Frequência de Tecimento | [Hz] |
| A | Amplitude de Tecimento | [m] |
| U | Tensão de Soldagem | [V] |
| I | Corrente de Soldagem | [A] |
| R | Resistência Elétrica | [Ω] |
| Va | Velocidade de Alimentação de Arame | [m/s] |
| E ₀ | Altura Relativa da Tocha de Soldagem | [m] |
| Vt | Velocidade Transversal da Tocha | [m/s] |

ALFABETO GREGO:

| | | |
|------------|-------------------|-----|
| θ_c | Ângulo de Chanfro | [°] |
|------------|-------------------|-----|

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automático de soldagem MIG, designado como seguidor de junta, que utiliza as próprias variáveis elétricas do arco voltaico como sensor de posição (sensor de arco). Tais sistemas são capazes de perceber e corrigir eventuais erros de alinhamento do conjunto tocha-peça durante a soldagem de juntas chanfradas e de filete.

O sistema baseia-se na variação do comprimento do eletrodo e do arco voltaico, que ocorre quando a distância entre a tocha e a peça é modificada através da aplicação de um movimento oscilatório (tecimento) à tocha de soldagem. Isso faz com que, no caso de se utilizar fontes de tensão constante, a corrente de soldagem também se modifique. Dessa forma, os valores da corrente são adquiridos nas extremidades da junta e comparados por um programa de controle. Se esses valores de corrente forem iguais, a tocha está centralizada, se forem diferentes, o sistema promove a correção da trajetória da tocha.

Para que o desenvolvimento do sistema fosse possível, foi montada uma bancada experimental em que foram utilizados equipamentos projetados e construídos no próprio ‘LABSOLDA’, destacan do-se, entre esses, o sistema automático de movimentação da tocha em dois eixos, designado por ‘TARTÍLOPE -V2’, cujo re-projeto mecânico também fez parte do escopo desse trabalho.

O desenvolvimento do sistema seguiu as seguintes etapas: ensaios de definição do algoritmo de controle, investigação prévia da influência de diversas variáveis de soldagem (velocidade de soldagem, frequência de tecimento, amplitude de tecimento, ângulo de desvio da junta) no funcionamento do sistema, comparação dos resultados obtidos com ensaios realizados num sistema de seguimento de junta comercial (robô industrial) e realização de ensaios em que se procurou empregar situações próximas às encontradas em operações reais de soldagem.

O sistema de seguimento de junta desenvolvido apresentou excelentes resultados, demonstrando robustez, simplicidade, repetitividade e qualidade das soldas. Dessa forma, obteve-se um sistema automático de soldagem eficiente e de relativo baixo custo, sendo este flexível e acessível às micros e pequenas empresas nacionais.

ABSTRACT

This work presents the development of an automatic welding system (for MIG/MAG welding process), designed to be a seam tracker. It utilizes the electrical variation of the voltaic arc as a position sensor. Such systems are capable of detecting and correcting eventual errors in the alignment of the welding torch and the piece being welded during the welding of two chamfered or filleted parts.

The system references the variation of the length of the electrode, which occurs when the distance between the torch and part being welded is varied due to the application of an oscillatory movement (weaving) to the welding torch. When using constant voltage sources, this oscillation also results in the variation of the welding current, so that the values of current are measured at the extremities of the weld, and compared by a control system program. If the current measurements are equal, it means the welding torch is centered, and if they are different, the system corrects the trajectory of the welding torch.

In order to develop the system, an experimental station was set up and the necessary equipment was designed and built at "LABSOLDA". Among the equipment used, an automatic two axes torch displacement system, so called TARTILOPE V2, is noteworthy. It had been previously developed at this laboratory and had its mechanical parts redesigned for this project.

This system was developed according to the following steps: final testing of the control algorithm, previous investigation of the effects of the welding variables (i.e. welding speed, weaving frequency, weaving amplitude, joint angle of deviation) in the systems function, comparison of the results achieved with the tests made with a commercial system (industrial robot) of joint tracking, and functional tests of situations similar to the ones found in actual welding operations.

The weld joint tracking system developed showed excellent results, demonstrating reliability, simplicity, repeatability, and ultimately, quality welds. Hence, an efficient automatic system with relatively low cost, which is affordable to small company businesses was achieved.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Com o aumento da competitividade mundial ocorrido nas últimas décadas, a busca constante pelo aperfeiçoamento tecnológico tornou-se uma exigência para a sobrevivência das empresas, sejam essas de pequeno, médio, ou grande porte. Nesse contexto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de aumentar a produtividade e a qualidade dos processos de manufatura.

Na área da soldagem, um dos principais problemas enfrentados constitui-se no fato do ambiente de trabalho ser altamente agressivo. Durante a realização da solda, o soldador fica exposto à radiação emitida pelo arco, aos gases tóxicos provenientes de reações químicas dos gases de proteção, aos salpicos de gotas de metal fundido a altas temperaturas, e, além disso, este ainda deve realizar diversas tarefas, tais como, guiar e manipular a tocha, ajustar os parâmetros de soldagem, controlar a qualidade do cordão de solda, etc. O resultado de todas essas solicitações é que o soldador fatiga-se rapidamente. Dessa forma, na soldagem manual ou semi-automática, o “ciclo de trabalho” (resultado da divisão entre o tempo em que se efetivamente está com o arco aberto realizando o depósito do material de adição e o tempo total da operação de soldagem) ou “tempo de arco aberto” torna-se reduzido, influenciando diretamente na produtividade do processo.

1.1 Objetivos e Justificativas

A automação dos processos de soldagem visa afastar o soldador do contato direto com a solda, diminuindo ou eliminado completamente seu envolvimento durante a operação de soldagem. Tal fato acarreta num aumento do “ciclo de trabalho” e, conseqüentemente, num aumento da produtividade do processo (Figura 1.1).

Entretanto, é importante entender que existem vários níveis de automação. À medida que as funções exercidas pelo soldador são transferidas ao sistema, o custo e a complexidade dos equipamentos envolvidos aumentam. Portanto, a escolha e implantação de tais sistemas devem ser realizadas tomando por base aspectos econômicos e técnicos, e não somente aspectos políticos e culturais, como ainda acontece em alguns casos.

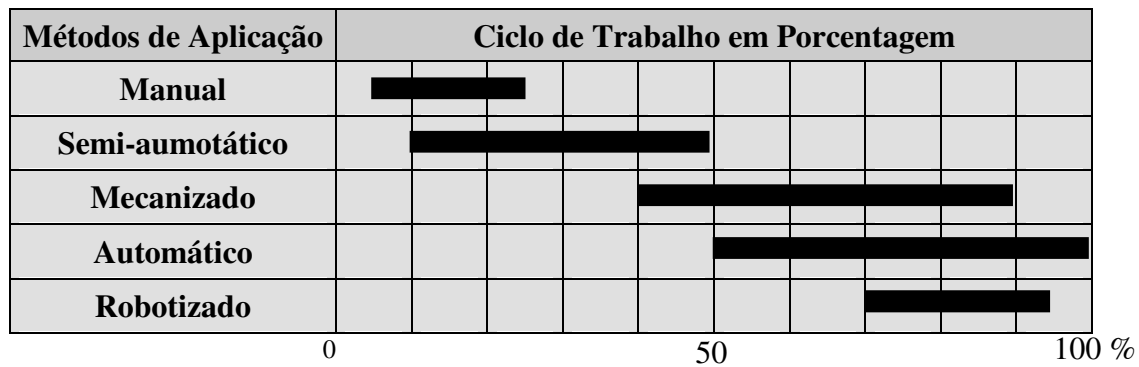


Figura 1.1 – Métodos de aplicação da solda e seus respectivos “ciclos de trabalho”, em porcentagem (adaptado de Carry, 1995).

As principais dificuldades encontradas na aplicação de sistemas automáticos de soldagem compreendem:

- ausência da sensibilidade do soldador;
- dificuldade em se garantir a repetitividade no posicionamento das peças;
- deformações das peças durante a soldagem que modificam a trajetória a ser seguida pela tocha;
- a ocorrência de distúrbios eletromagnéticos que resultam em defeitos no cordão de solda;
- incapacidade dos sensores em detectar alterações nas condições de soldagem;
- os sensores são sensíveis ao ambiente de soldagem.

A necessidade de um correto posicionamento da peça causa muitos problemas na soldagem mecanizada ou automatizada. Pode-se pensar em simplesmente utilizar trajetórias pré-programadas, entretanto, é praticamente impossível obter o posicionamento das peças sempre nas mesmas condições. Além disso, as peças sofrem deformações térmicas devido ao calor gerado pelo arco, que resultam em modificações da trajetória da junta durante a soldagem.

Portanto, faz-se necessário um sistema automático que seja capaz de efetuar as devidas correções no posicionamento da tocha durante a soldagem, garantindo assim a qualidade e a repetitividade do processo.

Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automático de soldagem que utiliza as próprias variáveis elétricas do arco voltaico como sensor (“sensor

de arco”). Esses sistemas, mais conhecidos por “Sistemas de Seguimento de Junta” (SSJ), são capazes de detectar e corrigir possíveis erros no posicionamento da tocha durante a soldagem.

O aumento da produtividade alcançado pelo sistema proposto acontece devido aos seguintes fatores:

- redução do tempo de preparação das juntas, que podem ter tolerâncias de fabricação mais folgadas;
- redução do tempo de “setup” para novas geometrias de peças;
- eliminação dos defeitos na solda causados pela deformação sofrida pela peça durante a soldagem;
- redução do número de peças refugadas;
- obtenção de soldas de boa qualidade;
- aumento do “ciclo de trabalho” ou “tempo de arco aberto”.

Outro fator importante para justificar o desenvolvimento do sistema é a inexistência de sistemas semelhantes fabricados no Brasil. Os equipamentos disponíveis baseiam-se em sistemas importados de elevado custo de aquisição e manutenção. Como geralmente os sensores de arco vêm incorporados a robôs industriais, pequenas e médias empresas acabam não usufruindo os ganhos em produtividade e competitividade alcançados com essa tecnologia. E mesmo quando micro e pequenas empresas conseguem adquirir tais dispositivos, defrontam-se com a falta de profissionais habilitados capazes de manusear corretamente o equipamento, resultando muitas vezes na sub-utilização do dispositivo e na conseqüente frustração do comprador.

CAPÍTULO 2 - RESUMO DAS INFORMAÇÕES DA LITERATURA

2.1 Classificação dos Métodos de Aplicação da Soldagem

No seu trabalho, Dutra (1989) cita que existem procedimentos de soldagem que, apesar de não utilizarem quaisquer dispositivos de condução da tocha, podem envolver mais automatismo do que se fossem efetuados através de robôs. Isso ocorre devido ao avanço tecnológico alcançado pelas fontes de soldagem. Atualmente, as fontes de concepções mais modernas incorporam funções de controle que auxiliam o soldador na realização da solda. Portanto, é praticamente impossível estabelecer limites bastante claros entre uma soldagem automática e uma não automática.

Malin (1985) analisou as operações envolvidas na soldagem e propôs a seguinte classificação para os possíveis métodos de aplicação da solda:

- soldagem mecanizada e;
- soldagem automatizada.

A soldagem mecanizada, por sua vez, possui dois subníveis designados por: “M1” e “M2”. O subnível “M1”, também conhecido por soldagem “semi -automática” ou “semimecanizada”, consiste nos processos onde o eletrodo é alimentado automaticamente por um dispositivo, como, por exemplo, nos processos MIG/MAG, arco-submerso e plasma alimentado. Malin também afirma que esses processos não podem ser ditos manuais, como são algumas vezes considerados. O nível “M2” difere do nível “M1” apenas pelo uso de um dispositivo de deslocamento automático da tocha. Esses sistemas são chamados tradicionalmente de “sistemas automáticos”, entretanto, não devem ser considerados automáticos, visto que geralmente não são capazes de exercer funções de estabilização dos parâmetros de soldagem. O uso equivocado desse termo causa muitas dúvidas e desentendimentos entre profissionais da área e, conseqüentemente, acaba interferindo no desenvolvimento do tema.

Continuando na classificação dos sistemas, a soldagem automatizada pode ser dividida em sete subníveis. O primeiro subnível, designado por “A3”, ocorre quando o sistema é capaz de exercer funções de estabilização dos parâmetros de soldagem. Se, por exemplo, um sistema mecanizado nível “M2” for capaz de estabilizar o movimento lateral da tocha (sistemas de seguimento de junta), este novo sistema será designado como sistema automático nível “A3”.

Os robôs aparecem no final da classificação, níveis “A7”, “A8” e “A9”. Sendo que o nível “A7” trata da utilização de robôs capazes de exercer operações de programação de parâmetros, tanto de movimentação da tocha, como de soldagem. Já os sistemas do nível “A8” são capazes de exercer operações de estabilização. Os robôs do nível “A9” aparecem com uma função adicional designada por “controle adaptativo”, ou seja, estes são capazes de se adaptar a novas situações, efetuando mudanças na sua programação a fim de otimizar os parâmetros de movimentação e de soldagem.

O anexo “A” apresenta um diagrama com os diferentes níveis de aplicação da soldagem, excetuando-se a aplicação manual (eletrodo-revestido).

Apesar da existência da norma “AWS 03.1:2001”, que traz no seu texto uma classificação para os métodos de aplicação de soldagem, preferiu-se utilizar nesse trabalho a classificação proposta por Malin (1985). Isso se deve ao fato da norma americana apresentar conceitos muito abrangentes e que causam dúvidas na sua interpretação.

2.2 Estado da Arte dos Sistemas de Seguimento de Junta

Segundo Cullison e Irving (1992), os SSJ começaram a receber particular atenção no início da década de 80, quando a “General Motors”, pressionada pela concorrência das empresas automobilísticas japonesas, resolveu investir no desenvolvimento dessa tecnologia. Entretanto, os autores relatam que essa decisão se mostrou prematura para a época. Os computadores não possuíam velocidade de processamento suficiente para suprir as necessidades do sistema e a tecnologia envolvida nos dispositivos de sensoriamento ainda não se encontrava à mão. Só a partir da segunda metade da mesma década, com os avanços na área da informática e com a conscientização dos pesquisadores que os dispositivos constituintes deveriam ser imunes ao ambiente agressivo de soldagem, foi que novos avanços foram alcançados. Desde então, o desenvolvimento dos sistemas automáticos de soldagem vem aumentando dia-a-dia, e uma nova geração de sistemas de seguimento de junta tem surgido.

Malin (1988) chama a atenção para o uso correto do termo “seguimento de junta”. O autor comenta que esse termo não deve ser atribuído a dispositivos que apenas executam uma trajetória pré-estabelecida e, tampouco, a sistemas que traçam o padrão da junta e depois seguem uma trajetória previamente gravada em um programa. Esses dispositivos são classificados como sistemas de “malha-aberta”, ou seja, não são capazes de receber

informações do processo durante a soldagem. Dessa forma, possíveis alterações no posicionamento inicial da junta não são corrigidas.

Os sistemas ditos de seguimento de junta baseiam-se na utilização de sensores capazes de obter informações do posicionamento da tocha em relação à peça de trabalho. Trata-se, portanto, de sistemas de malha-fechada, ou seja, são capazes de receber informações do processo durante a aplicação da solda (sistemas realimentados), percebendo e corrigindo quaisquer modificações no posicionamento inicial da junta.

Os sensores podem ser divididos em duas categorias básicas (Linden, 1988): os sensores de contato (táteis) e os sensores remotos. A tabela 2.1 enumera alguns dos diversos tipos de sensores utilizados nos SSJ.

Tabela 2.1 – Tipos de sensores utilizados nos sistemas de seguimento de junta.

| |
|------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Sensores de Contato (Táteis) |
| A. Mecânicos – sistema esfera-mola; |
| B. Eletromecânicos – sondas de contato (contínuo ou intermitente), arame-eletrodo. |
| II. Sensores Remotos |
| A. Acústicos – ultrassom; |
| B. Elétricos – indutivos, sensores de arco; |
| C. Óticos – fototransistores, fotodiodos, câmaras (CCD, PSD, MOS e ITV). |

2.2.1 Sensores de Contato (Táteis)

Os sensores de contato (táteis) têm sido utilizados nos sistemas de seguimento de junta há muitos anos (Carry, 1995). Dispositivos equipados com esse tipo de sensor abrangem desde sistemas mecânicos simples a sistemas eletromecânicos complexos. O sistema esfera-mola, no qual uma esfera metálica é posta em contato com a superfície a ser seguida, é o sistema mais simples que pode ser encontrado (Norrish, 1991). Nestes equipamentos, as variações na superfície da peça são captadas pelo conjunto esfera-mola. Com isso, a tocha de soldagem segue os movimentos gerados pela deflexão da mola (Figura 2.1).

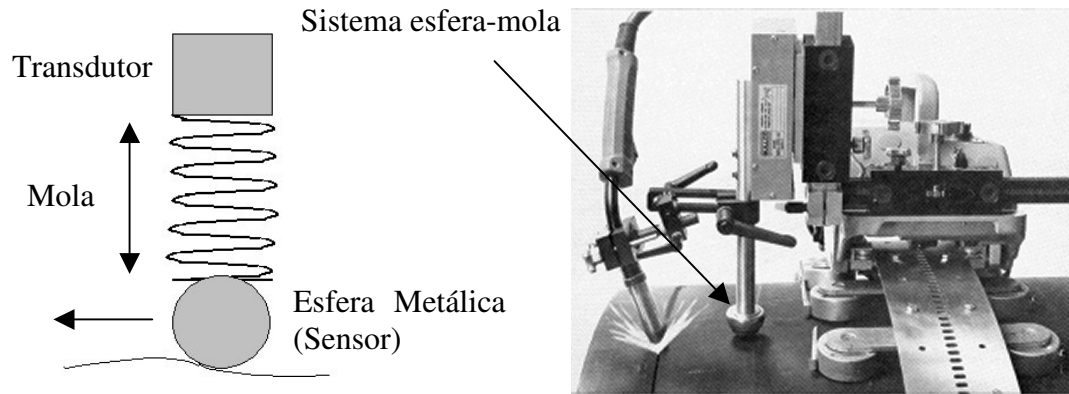


Figura 2.1 – Sistema esfera-mola utilizado para o controle da altura da pistola (Gullco, 1999).

Os sistemas eletromecânicos de contato apresentam maior versatilidade. Nesses sistemas, uma sonda metálica entra em contato com a superfície da peça a ser soldada, que pode ser uma junta em “V”, uma junta em “T” ou similar, gerando sinais elétricos para um sistema de controle (Figura 2.2).

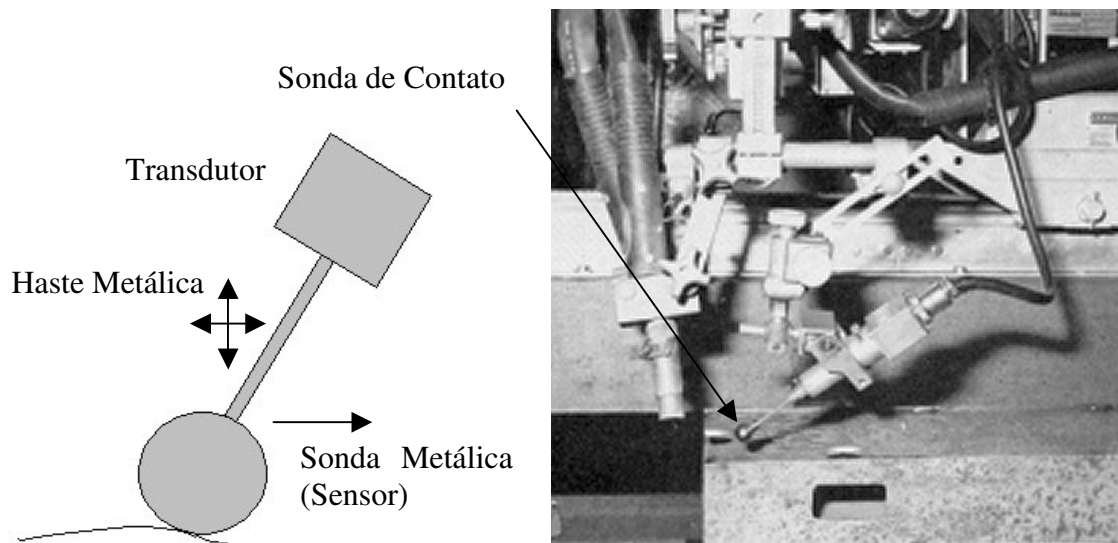


Figura 2.2 – Sistema de seguimento de junta com sonda de contato (Gullco, 1999).

As principais desvantagens desses tipos de sistemas constituem-se em:

- existência de uma certa distância entre a tocha de soldagem e o sensor (distância de “offset”). Sendo assim, o sensoriamento acontece com alguma distância do ponto real de soldagem;

- diminuição da acessibilidade da tocha devido à necessidade do acoplamento de dispositivos adicionais;
- desgaste do sensor ao longo do tempo.

Takeuchi (1991) mostra no seu trabalho uma técnica muito utilizada na indústria de robôs, que consiste na utilização do próprio arame-eletrodo como sensor de contato. Esse tipo de sensor é mais conhecido como “Sensor de Toque” ou “Touch Sensor”. Entretanto, é importante esclarecer que esses sistemas não devem ser classificados como SSJ, pois estes apenas seguem uma trajetória previamente estabelecida através do contato do arame-eletrodo em diversos pontos da junta.

2.2.2 Sensores Remotos

Os sensores remotos têm-se tornado bastante populares nos últimos anos. Isso ocorreu devido à redução do custo dos equipamentos e à excelente precisão que alguns sensores dessa categoria podem alcançar.

Os sensores de ultra-som baseiam-se na determinação do tempo Δt , intervalo de tempo entre os instantes em que o pulso é transmitido e recebido, para medir a distância entre o sensor e o metal de base (Zhang et al. 1998). Dessa forma, um dispositivo de deslocamento automático da tocha utiliza-se das informações provenientes dos sensores para ajustar o posicionamento da tocha.

Sensores magnéticos usam a corrente parasita gerada no metal de base para reconhecer a geometria da junta. Isso ocorre devido à geração de um campo magnético através de uma bobina que está localizada próxima ao metal de base. Uma outra bobina atua como sensor e detecta a variação dessa corrente.

A indutância ou corrente induzida no metal de base também pode ser usada de uma outra forma nos sistemas de seguimento de juntas. Nesse caso, o sensor possui duas bobinas que apenas detectam a corrente parasita. O sensor varre a peça e produz sinais que informam a localização da junta.

Contudo, os sensores elétricos mais conhecidos comercialmente são os chamados “sensores de arco”. Eles utilizam as próprias variações da corrente ou da tensão de soldagem

para obter informações do posicionamento da tocha em relação à junta. Detalhes desse tipo de sistema serão apresentados mais adiante no texto.

Dentre os sistemas óticos, destacam-se os que utilizam tecnologia LASER (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Sistema de seguimento de junta com tecnologia LASER (Metatech, 2000).

O feixe de luz varre a junta transversalmente e uma unidade de controle identifica a geometria, possibilitando o ajuste da trajetória da tocha.

2.3 Sistemas de Seguimento de Junta Que Utilizam o Próprio Arco Voltaico como Sensor ('Sensor de Arco')

Dentre os sistemas de seguimento de junta citados, os sistemas que utilizam os chamados "Sensores de Arco" são os mais largamente difundidos nas diversas áreas da indústria mecânica. Isso se deve às exaustivas pesquisas realizadas por institutos e fabricantes de robôs industriais, que viram nesse tipo de sistema um grande potencial no que concerne à automação dos processos de soldagem.

2.3.1 Princípio de Funcionamento

O uso do arco voltaico como sensor de posicionamento fundamenta-se na relação existente entre as variáveis elétricas do processo de soldagem e a distância entre a tocha e a peça de trabalho. Na soldagem MIG/MAG realizada com uma fonte de tensão constante,

pequenas variações na distância tocha-peça, referenciada na figura 2.4 pela distância bico de contato-peça (DBCP), introduzem mudanças no comprimento do eletrodo ($Le1 > Le2$).

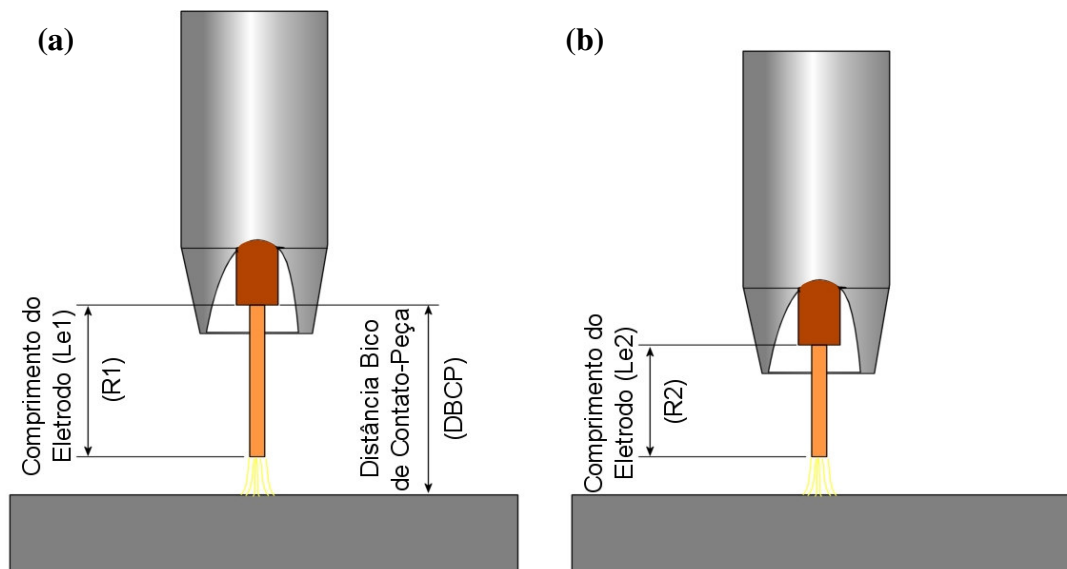


Figura 2.4 – Desenho esquemático de uma tocha MIG/MAG mostrando a variação no comprimento do eletrodo com a DBCP.

Dessa forma, aplicando-se à tocha de soldagem um movimento oscilatório (movimento de tecimento), faz-se com que, em determinadas configurações de juntas, a DBCP varie ao longo da soldagem. A figura 2.5 apresenta uma série de desenhos com as possíveis posições da tocha enquanto é aplicado a esta um movimento de tecimento na soldagem de uma junta de topo em “V”.

É importante ressaltar que o movimento de tecimento é essencial para o funcionamento do sistema e que existem diversos padrões diferentes de tecimento (figura 2.6). As principais características desse movimento são a frequência (f) e a amplitude (A) em que a tocha se movimentará, e, também, se esses parâmetros irão variar ou não durante o seguimento da junta.

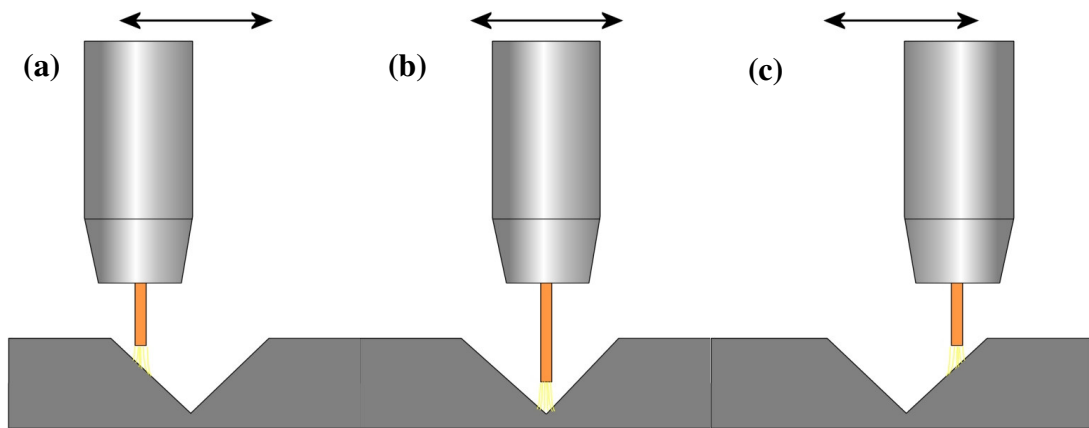


Figura 2.5 – Variação do comprimento do eletrodo com o movimento de tecimento da tocha de soldagem: (a) – extremidade esquerda; (b) – centro; (c) – extremidade direita.

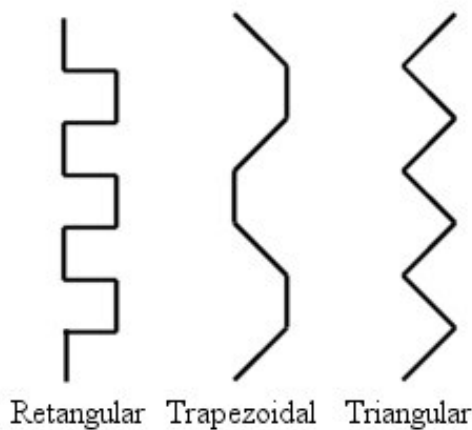


Figura 2.6 – Padrões de tecimento.

Por sua vez, a variação no comprimento do eletrodo influencia na resistência elétrica total do circuito de soldagem. Entretanto, cabe observar que esta influência só é significativa na soldagem com arames-eletrodos ferrosos, já que em materiais de alta condutividade, como o alumínio e o cobre, a variação da resistência elétrica com a DBCP é muito pequena (Kim e Na 1995). Portanto, com a diminuição do comprimento do eletrodo (figura 2.5a e figura 2.5c), a resistência elétrica do circuito de soldagem diminui, causando mudanças na corrente ou na tensão de soldagem. O modo como essas variações ocorrem depende do ajuste da fonte de energia. Como prediz a equação 2.1, se a fonte de energia estiver ajustada para fornecer tensão (U) constante, a corrente (I) de soldagem modificar-se-á de forma inversamente

proporcional à resistência. Caso a fonte forneça corrente constante, a tensão se modificará de forma diretamente proporcional à resistência do circuito.

$$U = R.I \quad (2.1)$$

A figura 2.7 mostra um oscilograma da corrente média de uma solda realizada com tecimento numa junta em “V”, sendo as indicações (a), (b) e (c), as posições relativas da tocha conforme mostrado na figura 2.5.

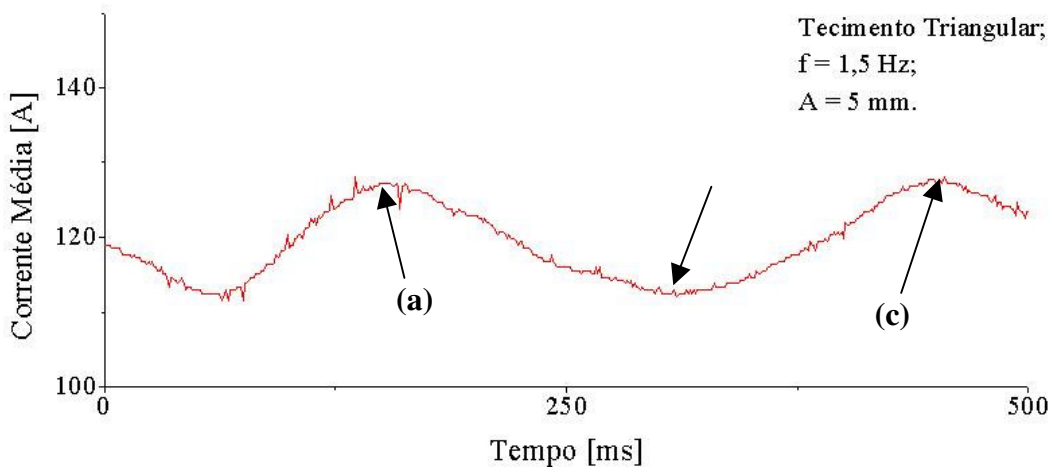


Figura 2.7 – Oscilograma da corrente média de uma solda realizada com tecimento numa junta em “V”.

Portanto, através da leitura da tensão ou da corrente de soldagem, é possível obter informações do posicionamento da tocha em relação à junta. A figura 2.8 mostra um exemplo de como se pode utilizar a corrente de soldagem para verificar se a tocha está corretamente posicionada. No primeiro caso, figura 2.8a, os valores da corrente de soldagem nas extremidades do movimento (I1 e I2) encontram-se iguais, demonstrando que a tocha encontra-se centralizada. Já quando a tocha está descentralizada, as correntes nas extremidades (I3 e I4) tornam-se diferentes (figura 2.8b). Nesse caso, o sistema deve ser capaz de corrigir a trajetória da tocha, a fim de que os valores da corrente nas extremidades voltem a ser iguais.

Apesar de ambos os tipos de ajustes da fonte de energia (controle da corrente ou comando da tensão) encontrarem aplicações na soldagem, o mais comum nos SSJ baseados no processo MIG/MAG é o modo de comando de tensão. A principal razão dessa escolha é devido ao efeito de auto-ajustamento do comprimento do arco inerente a este modo (Kim e Na, 1991a). Com a diminuição da DBCP, o comprimento do arco tende a diminuir e a corrente de soldagem aumenta, fazendo com que a taxa de fusão cresça e o comprimento inicial do arco seja restabelecido. A este sistema chama-se de “controle da velocidade de fusão” ou “controle interno” e nele, o dispositivo de alimentação do arame-eletrodo não altera sua velocidade ao longo da soldagem (Dutra, 1998).

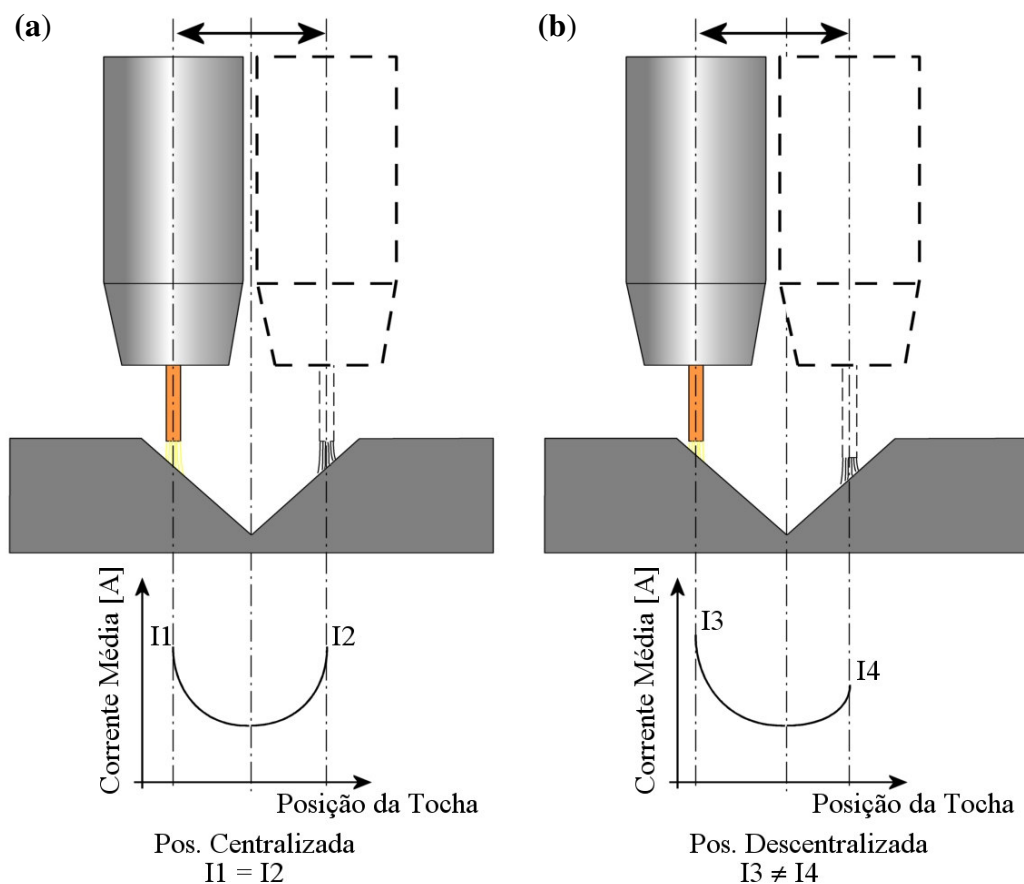


Figura 2.8 – Exemplo de como o sinal da corrente de soldagem pode ser utilizado para verificar o posicionamento da tocha de soldagem. (a) – Posição Centralizada, (b) – Posição Descentralizada.

2.3.2 Métodos de Implementação

Apesar de se basearem no mesmo princípio de funcionamento, os Sistemas de Seguimento de Junta que utilizam o arco voltaico como sensor apresentam algumas variações no que concerne ao seu modo de implementação. As diferenças vão desde o equacionamento matemático do sistema de controle, até a característica do movimento oscilatório imposto à tocha de soldagem (tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Diferentes métodos de implementação dos Sistemas de Seguimento de Junta que utilizam o arco voltaico como sensor.

| Modos | Direções de Movimentação da Tocha | Frequência de Tecimento | Equacionamento |
|-------|-----------------------------------|-------------------------|----------------|
| 1 | XY | Constante | Linear |
| 2 | XY | Constante | Quadrático |
| 3 | XYZ | Variável | Linear |

Kim e Na (1991a, 1991b), através do emprego dos métodos da análise fatorial e dos mínimos-quadrados, estabeleceram um modelo linear que relaciona a corrente de soldagem (I), a DBCP, a velocidade de alimentação de arame (V_a) e a tensão de soldagem (U) (equação 2.2).

$$I = (100,6370 + 1,0684.U + 20,3947.V_a + 0,1592.U.V_a) + (-1,4612 - 0,2750.V_a - 0,0065.U)DBCP \quad (2.2)$$

Dessa forma, o sistema procura manter constante a DBCP, que pode ser estimada através da leitura da corrente de soldagem. O seguimento da junta se dá pela inversão do sentido do movimento de tecimento quando a altura relativa da tocha chega a um valor pré-determinado (E_0) (figura 2.9).

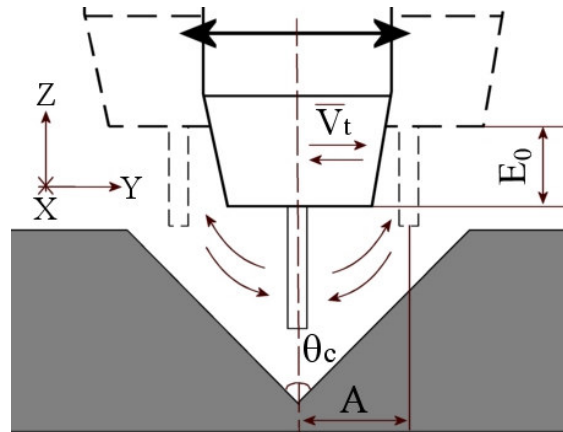


Figura 2.9 – Primeiro Sistema de Seguimento de Junta proposto por Kim e Na (1991a e b).

Nota-se, portanto, que a movimentação da tocha ocorre nas três direções: na direção paralela à linha de soldagem (X), na direção transversal (Y) e na direção normal ao plano da superfície da peça (Z). Outra característica do sistema é que a frequência de tecimento (f) varia com o ângulo de chanfro (θ_c) da junta. Pode-se demonstrar isso através de um desenvolvimento lógico simples:

- ♣ $f = 1 / T$, onde T é o período;
- ♣ $T = A / V_t$, onde V_t é a velocidade transversal, que é constante, e A é a amplitude de tecimento;
- ♣ Logo, $f = V_t / A$, onde A depende do ângulo de chanfro (θ_c) e do parâmetro E_0 .

O sistema se mostrou útil para aplicações práticas e sua principal vantagem é a simplicidade do modelo matemático utilizado (linear). Entretanto, podem-se citar como principais desvantagens: a maior complexidade do dispositivo de deslocamento automático da tocha, devido à necessidade do eixo vertical (Z), e o fato do sistema não funcionar quando é utilizado CO_2 como gás de proteção (transferência por curto-circuito).

Na tentativa de tornar o sistema mais robusto e simples, no que concerne ao equipamento de movimentação automática da tocha, Kim e Na (1991c) propuseram um novo modelo matemático para o sistema. Baseados nos trabalhos de Lin e Eagar (1985) e Nishiguchi et al (1986), onde se mostra que a poça metálica adquire uma forma arredondada durante a soldagem, os autores utilizaram o método da “regressão polinomial” para ajustar uma curva quadrática que relacionasse a corrente de soldagem e o tempo (equação 2.3).

$$I = k_0 + k_1.t + k_2.t^2 \quad (2.3)$$

O sistema funciona da seguinte maneira, quando a tocha completa um ciclo de varredura, ou seja, desloca-se de uma extremidade a outra da junta, o sinal da corrente de referência é ajustado pela equação 2.3, onde k_0 , k_1 e k_2 são constantes previamente determinadas. Então, estando a tocha numa extremidade da junta, a diferença (ΔI) entre o valor medido da corrente de soldagem e o valor ajustado da corrente de referência é calculado. Dessa forma, pode-se estimar a variação da DBCP (ΔL) (figura 2.10) pela equação 2.4.

$$\Delta L = \frac{\Delta I}{\alpha} \quad (2.4)$$

Onde α é uma fator que depende da tensão de soldagem e da velocidade de alimentação do arame.

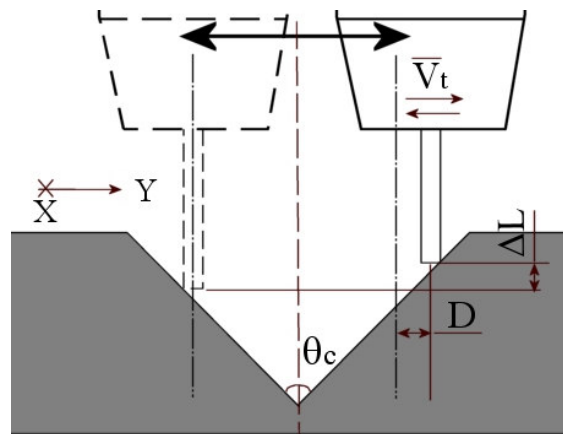


Figura 2.10 – Segundo Sistema de Seguimento de Junta proposto por Kim e Na (1991c).

Vale ressaltar que o valor da corrente de referência utilizado no cálculo de ΔI é determinado quando a tocha encontra-se no centro da junta.

Portanto, o desvio (D) da linha central de tecimento em relação à linha de soldagem pode ser determinado pela equação 2.5.

$$D = -\Delta L \cdot \tan\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \quad (2.5)$$

Usando esse valor do desvio (D), o posicionamento da tocha é então corrigido pela variação da velocidade transversal do tecimento (V_t) num determinado sentido, ou seja, a velocidade transversal é corrigida durante o movimento da tocha da direita para a esquerda e mantida constante no sentido contrário.

Como o tempo de varredura é constante, determinado pela divisão da amplitude pela velocidade transversal desejada, a frequência de tecimento permanece constante enquanto a amplitude varia num sentido do tecimento.

Segundo os autores, o modelo demonstrou uma maior estabilidade no movimento da tocha, confirmando sua maior adequação ao seguimento da junta. O sistema funcionou tanto com misturas de gases como com o CO₂ puro como gás de proteção.

Dutra et al (1995) também desenvolveram um protótipo de um sistema de seguimento de junta. Neste, o desvio (D) da linha central de movimentação da tocha é estimado diretamente através da diferença das correntes de soldagem nas extremidades da junta (Im) (equação 2.6).

$$Im = k_0 + k_1 \cdot D + k_2 \cdot D^2 \quad (2.6)$$

Neste sistema, a frequência e a amplitude de tecimento são mantidas constantes. O seguimento da junta se dá através do deslocamento da linha central de tecimento. Foram obtidos bons resultados apesar da simplicidade do sistema em questão, demonstrando a viabilidade em se usar o arco voltaico como sensor de posicionamento.

CAPÍTULO 3 - O SISTEMA MECÂNICO DE DESLOCAMENTO DA TOCHA – “TARTÍLOPE -V2”

O LABSOLDA já atua no desenvolvimento de equipamentos voltados à mecanização e à automação da soldagem há vários anos. A necessidade em se desenvolver esses dispositivos baseia-se, principalmente, na inexistência de sistemas equivalentes fabricados no Brasil. Os sistemas importados, além de terem alto custo de aquisição, geralmente não permitem qualquer implementação adicional. Essa dependência tecnológica acaba por impor um certo limite às pesquisas realizadas com esses dispositivos e à sua utilização em geral. Portanto, para se ultrapassar essa barreira, deve-se procurar, cada vez mais, desenvolver equipamentos genuinamente nacionais que possam ser facilmente adaptados às exigências do mercado brasileiro e que se prestem ao desenvolvimento da tecnologia nacional.

3.1 Sistema mecânico de deslocamento da tocha em um eixo – ‘SDP -600’, ‘SDP -MP’ e ‘Tartílope -V1’

O ‘SDP’, Sistema de Deslocamento e Posicionamento, nas suas versões ‘600’ e ‘MP’ (Figura 3.1), foi o primeiro equipamento construído no LABSOLDA com a finalidade de carregar a tocha de soldagem.

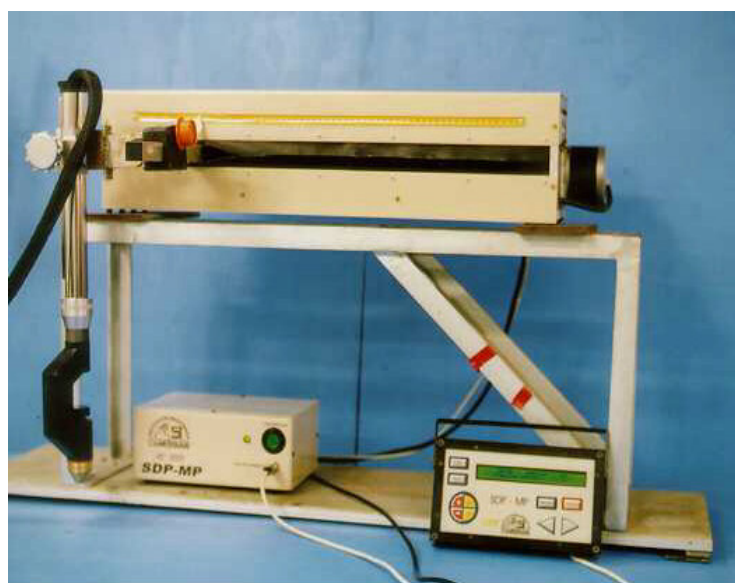


Figura 3.1 – Sistema de Deslocamento e Posicionamento – “SDP-MP”.

Seu sistema mecânico de movimentação é composto, basicamente, por uma guia, um acoplamento, um fuso e um motor (Figura 3.2).

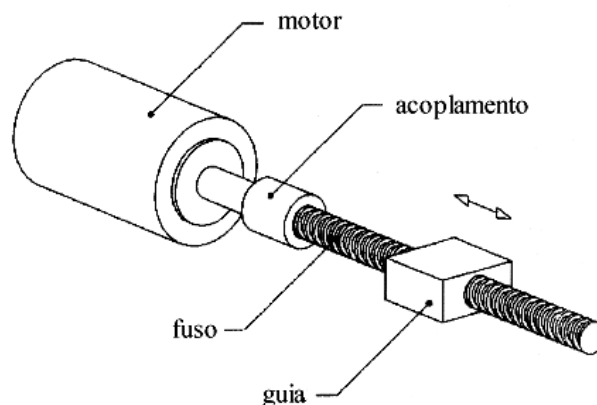


Figura 3.2 – Esquema do sistema mecânico de movimentação da tocha utilizado no ‘SDP’.

Dessa forma, o movimento giratório do fuso, que é promovido por um motor de corrente contínua, na versão ‘600’, ou por um motor de passo, na versão ‘MP’, faz com que a guia se desloque linearmente. A tocha, por sua vez, encontra-se conectada à guia através de um sistema de fixação. Os controles da velocidade e do posicionamento são realizados através de um sistema de controle eletrônico.

Os principais problemas encontrados nesse tipo de dispositivo são:

- elevado peso;
- só podem efetuar pequenas trajetórias (600 mm);
- difícil fabricação, pois as peças componentes possuem tolerâncias apertadas;
- baixa mobilidade e praticidade de uso.

No sentido de solucionar tais limitações, surgiu o projeto do equipamento designado por ‘Tartílope -V1’ (Figura 3.3).

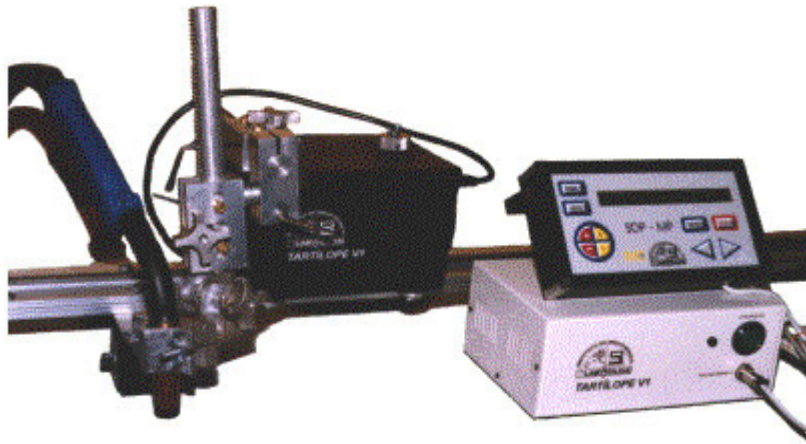


Figura 3.3 – Sistema mecânico de deslocamento da tocha em um eixo – “Tartílope -V1”

O deslocamento do carro ao longo do trilho é proporcionado por um sistema pinhão-cremalheira, onde o pinhão recebe o movimento giratório promovido por um motor de passo. Como a cremalheira é fixa ao trilho, o movimento giratório do pinhão é então transformado em deslocamento linear do carro. A tocha de soldagem é acoplada a um sistema de fixação que está conectado ao carro. Os ajustes de velocidade e de posicionamento são realizados através de um controle remoto.

Esse tipo de equipamento apresenta as seguintes vantagens:

- o carro pode cobrir longas trajetórias, bastando acoplar quantos trilhos forem necessários;
- o peso do carro é relativamente pequeno, sendo fácil de transportá-lo;
- boa mobilidade e praticidade de uso.

Entretanto, como citado anteriormente, para que o sistema de seguimento de junta funcione, é necessário que a tocha de soldagem efetue um movimento de tecimento ao longo da junta. Portanto, o dispositivo de deslocamento deve poder atuar em dois eixos de movimentação, e não apenas em um eixo, como é o caso do “Tartílope -V1”. Tal necessidade, em conjunto com diversas aplicações adicionais que um sistema de dois eixos possui, culminou no projeto de um novo dispositivo, o qual foi designado por “Tartílope -V2”.

3.2 Sistema mecânico de deslocamento da tocha em dois eixos - “Tartílope -V2”

O primeiro protótipo concebido para a movimentação em dois eixos constituiu-se na simples implementação de um braço mecânico ao “Tartílope -V1”, figura 3.4.

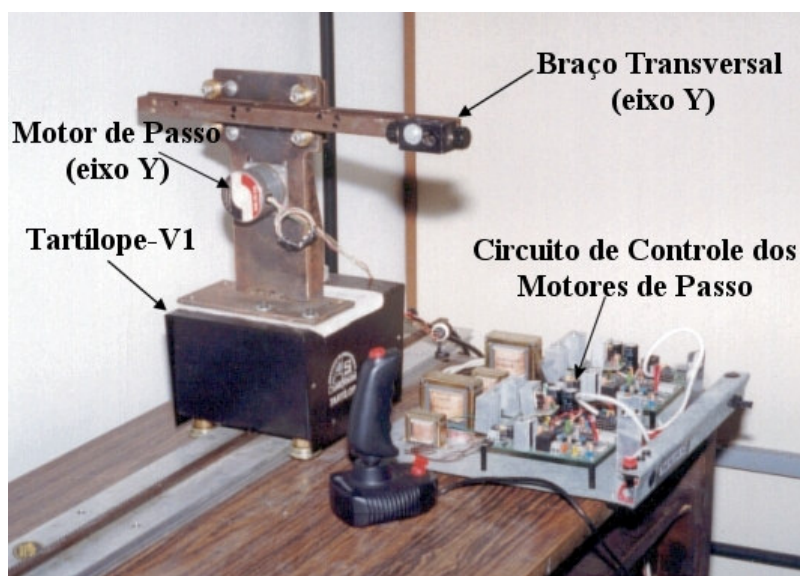


Figura 3.4 – Primeiro protótipo do sistema mecânico de deslocamento em dois eixos.

A partir desse ponto, iniciou-se um novo projeto para o dispositivo. O objetivo agora era otimizar a parte mecânica do equipamento, de forma que os sistemas responsáveis pela movimentação dos dois eixos ficassem embutidos num único gabinete. A figura 3.5 apresenta o resultado do primeiro projeto.

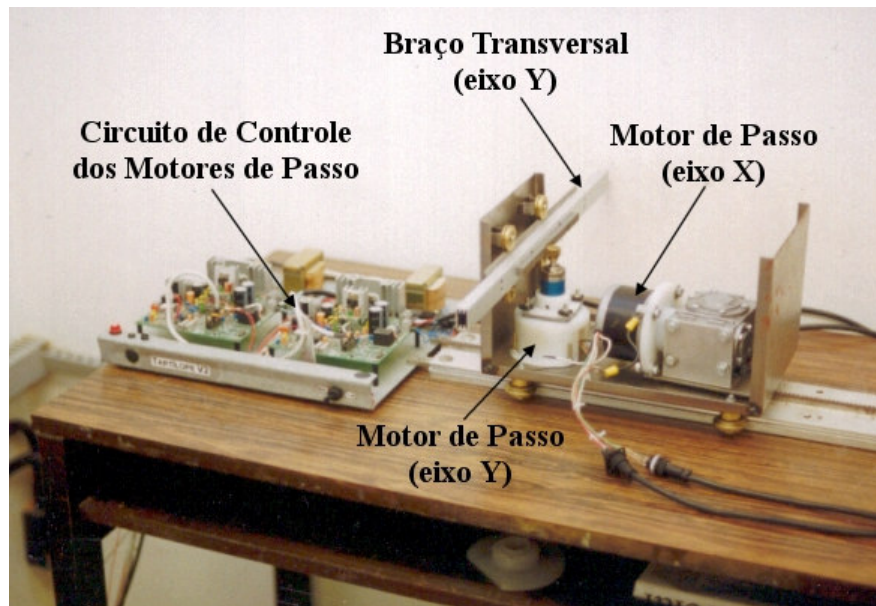


Figura 3.5 – Primeira versão do “Tartílope -V2” que apresenta os dispositivos de movimentação dos dois eixos embutidos num único gabinete.

Percebeu-se, porém, que a disposição dos dispositivos de movimentação dos eixos ainda poderia ser otimizada de forma a diminuir o comprimento do carro. Tal otimização melhoraria a rigidez e a mobilidade do conjunto. O resultado dessa primeira otimização é apresentado na figura 3.6.

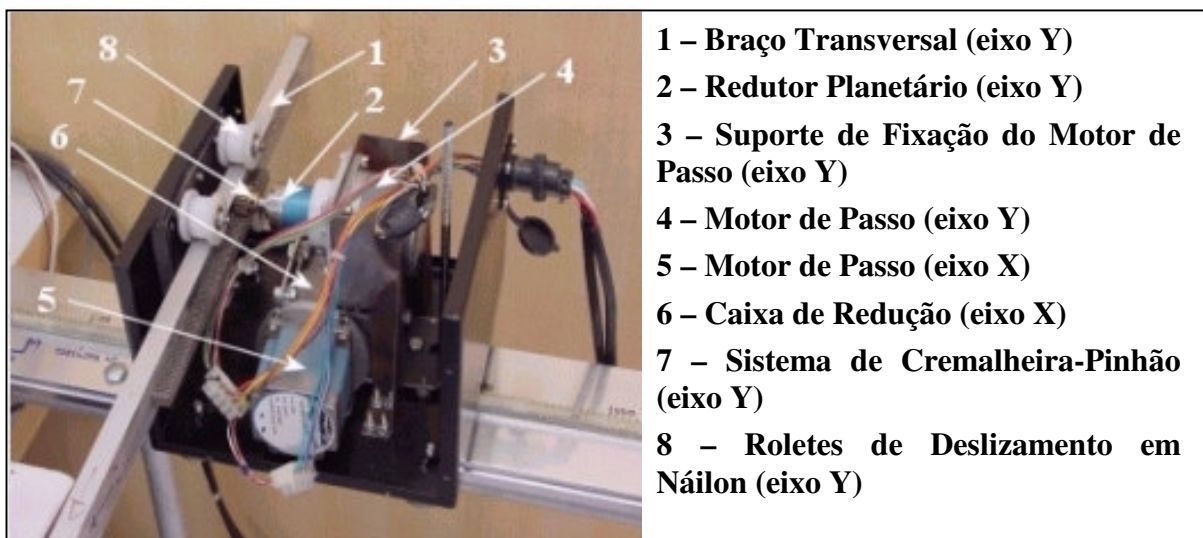


Figura 3.6 – Segunda versão do “Tartílope -V2” onde foi realizada uma primeira otimização na disposição dos dispositivos de movimentação dos eixos.

Nota-se que o sistema de movimentação do eixo Y encontra-se agora acima do sistema do eixo X, diminuindo consideravelmente o comprimento do carro. Entretanto, verificou-se ainda a existência de alguns problemas nessa fase do projeto:

- vibração excessiva do conjunto;
- os roletes em náilon se desgastaram rapidamente;
- baixa rigidez do suporte de fixação do motor de passo do eixo Y;
- os motores de passo selecionados apresentaram faixas de ressonância bastante grandes, inviabilizando o uso do equipamento em certos ajustes de velocidade.

Devido às dificuldades encontradas, foi realizado um re-projeto completo de seu sistema mecânico (Figura 3.7).

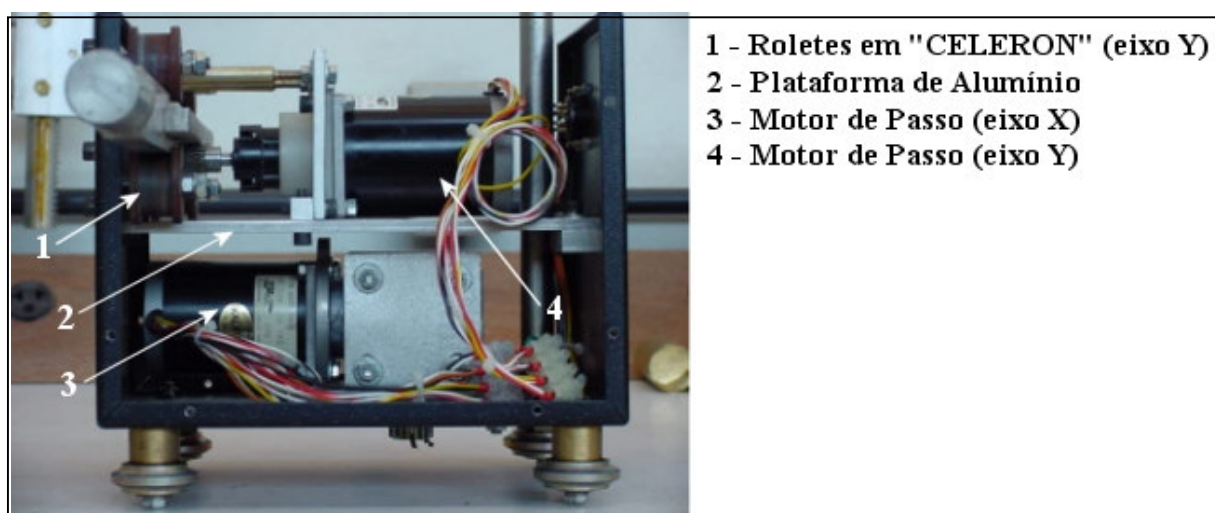


Figura 3.7 – Re-projeto do sistema mecânico do “Tartílope -V2”.

Nota-se, portanto, que o novo suporte do eixo Y apresenta-se apoiado numa plataforma de alumínio, a qual é fixada nas paredes do gabinete. Dessa forma, conseguiu-se aumentar a rigidez do conjunto.

O braço transversal é apoiado em três roletes, os quais estão dispostos nos vértices de um triângulo imaginário (figura 3.8). O rolete superior, por sua vez, está fixado a uma peça excêntrica que é responsável pelo ajuste da pressão exercida no braço.

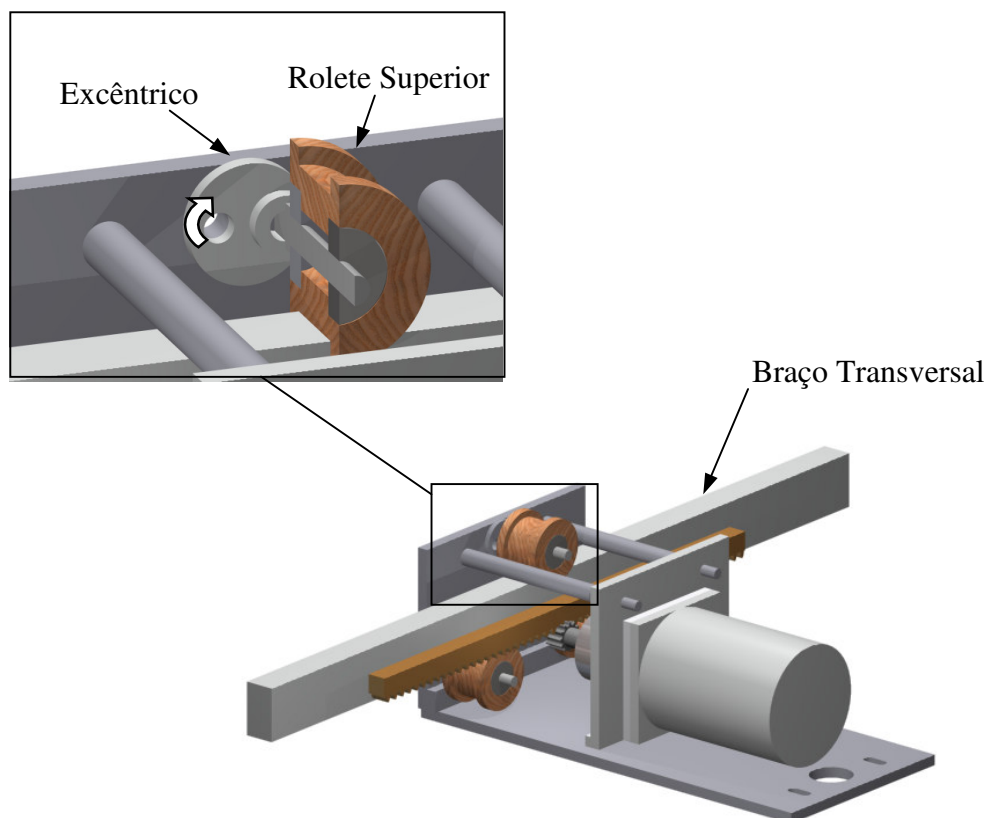


Figura 3.8 – Sistema de fixação do braço Y.

Os motores de passo, que no projeto anterior eram diferentes, foram substituídos de maneira que fossem utilizados os mesmos motores para os dois eixos, otimizando a montagem e a aquisição desses componentes. Os novos roletes foram confeccionados com “CELERON”, um polímero de maior resistência do que o náilon, e apenas três roletes compõem o sistema de deslizamento do braço. Outra modificação importante consistiu na nova disposição longitudinal do motor do eixo X, conseguindo-se, assim, reduzir a largura do gabinete.

Contudo, o sistema de fixação do braço não se mostrou eficiente. Dois problemas foram notados: os roletes ficaram pequenos, e não se conseguia fixar satisfatoriamente o rolete superior. Este não mantinha sua posição inicial de ajuste e o braço, ora se apoiava em um rolete inferior e no rolete superior (figura 3.9a), ora nos dois roletes inferiores (figura 3.9b), tornando o movimento instável.

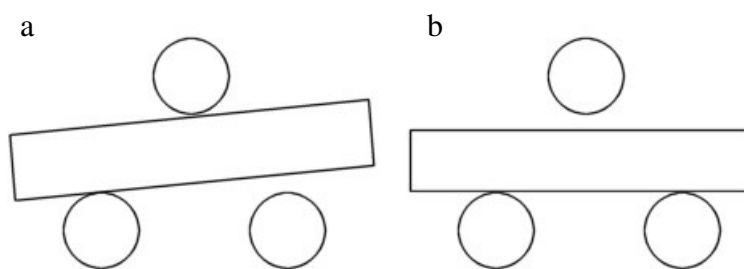


Figura 3.9 – Problema causado pela má fixação do rolete superior.

Percebeu-se também que os roletes e seus eixos deveriam ser reforçados, de modo a suportar possíveis esforços adicionais como, por exemplo, quedas, excesso de carga no braço, entre outras situações comuns no ambiente industrial.

Com isso, um novo projeto foi concebido. A figura 3.10 apresenta a nova disposição dos roletes e seu novo sistema de fixação.

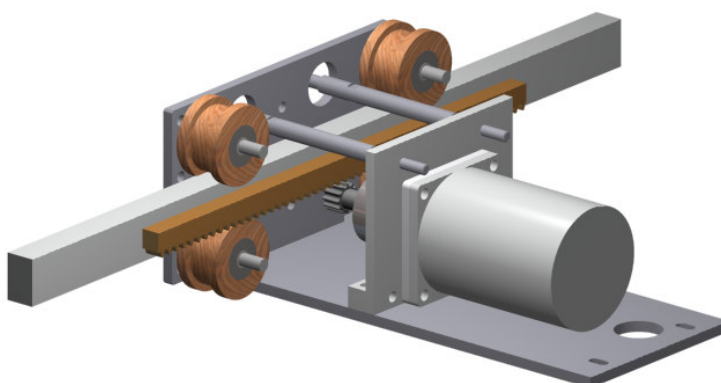


Figura 3.10 – Nova concepção do sistema de fixação do braço transversal.

Nesse novo projeto, o braço se apóia em quatro roletes, sendo que os dois roletes superiores estão fixados a uma barra chata de aço que, por sua vez, é fixada ao gabinete através de quatro parafusos. O ajuste da pressão exercida no braço acontece devido aos furos para a fixação dos parafusos serem de geometria ovalada. Os diâmetros dos roletes e dos seus eixos também foram aumentados.

Uma última modificação foi proposta no sentido de diminuir os desgastes dos roletes e de tornar o sistema menos sensível a pequenos erros de fabricação. A figura 3.11 apresenta o projeto final do equipamento.

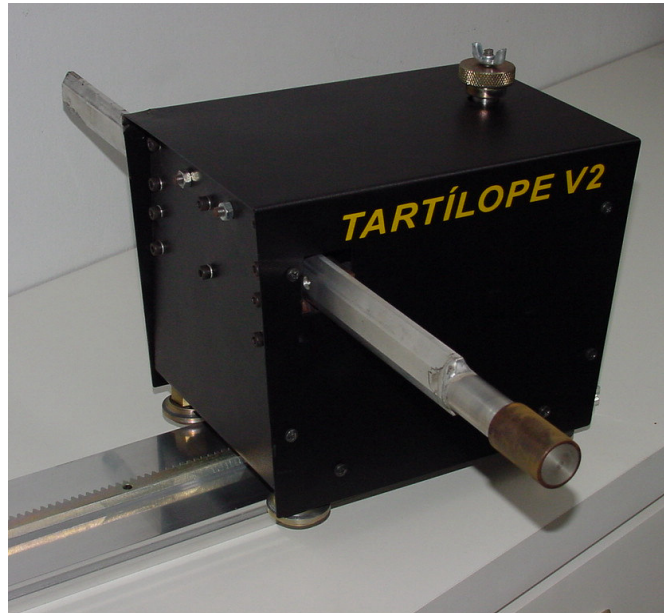


Figura 3.11 – Projeto final do “Tartílope -V2”.

A nova geometria hexagonal do braço “Y” aumenta a área de contato entre este e os roletes, permitindo uma melhor acomodação do braço e evitando o apoio em cantos vivos.

CAPÍTULO 4 - MONTAGEM DA BANCADA EXPERIMENTAL

Para a realização desse trabalho, foram montadas duas bancadas experimentais. A primeira bancada, designada no texto por ‘Bancada de Desenvolvimento’, foi utilizada para o desenvolvimento do sistema em si. Nesta, como quase todos os equipamentos foram desenvolvidos no próprio ‘LABSOLDA’, com exceção dos microcomputadores, foi possível obter um controle aprimorado das variáveis pertinentes ao funcionamento do sistema, o que seria difícil de se conseguir no caso da utilização de sistemas comerciais devido sua arquitetura fechada.

A segunda bancada, composta por um sistema de seguimento de junta disponível comercialmente, foi utilizada com o intuito de se realizar uma avaliação comparativa do sistema desenvolvido. Para fins de categorização ao longo do texto, essa bancada será designada por ‘Bancada de Avaliação’.

O texto a seguir apresenta as principais características dos equipamentos envolvidos. Inicialmente, serão descritos os módulos comuns as duas bancadas e, nas duas seções finais, serão apresentadas as montagens específicas de cada uma delas.

4.1 Fonte de soldagem ‘INVERSAL -300’

A fonte de soldagem ‘Inversal -300’ foi projetada para operar em diversos processos e modos de soldagem. Sua principal característica consiste no emprego da técnica de chaveamento dos transistores para o controle das variáveis de soldagem (Gohr Jr., R 1992). O funcionamento desta fonte obedece, em princípio, a estrutura de uma fonte transistorizada no secundário (figura 4.1). Entretanto, devido à necessidade de produção de corrente alternada, sua topologia ficou de acordo com a figura 4.2, onde se pode notar o emprego de quatro IGBT’s. Assim, quando se deseja polaridade positiva no eletrodo, a unidade de controle faz funcionar os transistores 1 e 4, e em caso de polaridade negativa, os transistores 2 e 3 são acionados (Gohr Jr., R., 2002). Os principais dados técnicos referentes à fonte ‘Inversal -300’ são apresentados na tabela 4.1.

Nesse trabalho, a fonte foi ajustada para funcionar no modo de comando de tensão.

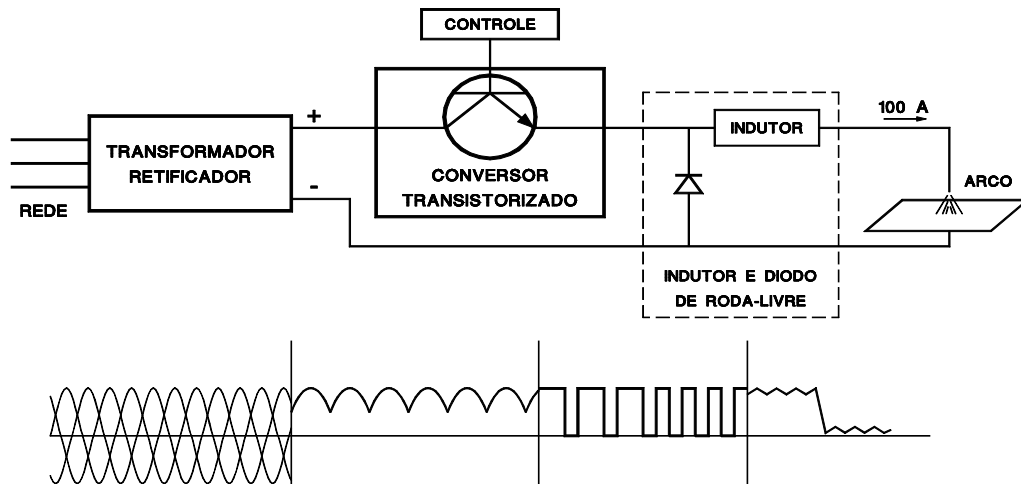


Figura 4.1 – Diagrama de funcionamento simplificado de uma fonte chaveada no secundário (Gohr Jr., R., 2002).

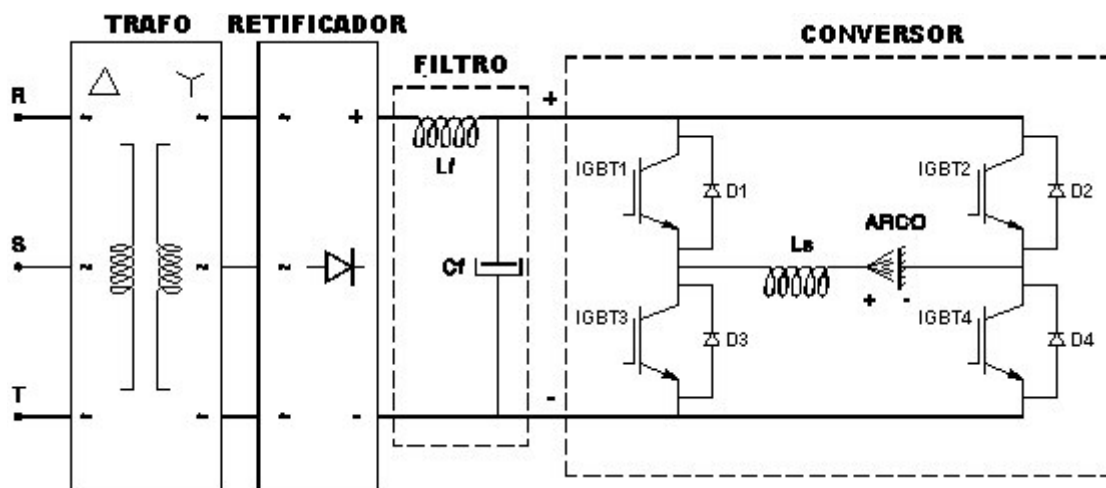


Figura 4.2 – Diagrama esquemático da fonte Inversal-300 (Gohr Jr., R., 2002).

Tabela 4.1 – Dados técnicos da fonte de soldagem “Inversal -300”.

| | |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Tensão de Alimentação (V) | 220,380,440 |
| Tensão em vazio no secundário (V) | 56 |
| Tipos de Corrente | Contínua ou alternada (constante ou pulsada) |
| Corrente Nominal (A) a 100% de carga | 300 |
| Potência máxima consumida (kW) | 12 |
| Fator de potência | 0,94 |

4.2 Sistema de Medição das Variáveis Elétricas de Soldagem

O sistema de medição empregado constituiu-se de um equipamento de medição de corrente e tensão (TC-1), uma placa de aquisição de dados (INTERDATA) e um programa computacional de tratamento de dados (OSCILOS).

O TC-1 é um instrumento de medição com características específicas para a medição de corrente e tensão no arco. Sua faixa de medição compreende valores de tensão entre 3 e 60V e de corrente entre 5 e 500A. O sistema apresenta uma incerteza de 1% para a corrente e 0,6% para a tensão. O TC-1 é capaz de medir valores instantâneos, médios e eficazes para corrente e tensão, e possui ainda uma saída em nível DC que permite acoplá-lo a um sistema de aquisição de dados.

O sistema INTERDATA-TC-1 é o resultado do acoplamento do TC-1 com um sistema de aquisição de sinais tipo “plug-in”, denominado INTERDATA. A placa INTERDATA é responsável pela aquisição dos sinais provenientes do módulo condicionador do TC-1 que, por meio de circuitos eletrônicos, recebe os sinais dos sensores de corrente e tensão e os adapta para o nível de tensão dos canais de entradas analógicas da placa (Corrêa, M. A., 1999). Assim, a principal função da placa é converter esses sinais analógicos em sinais digitais, de modo que a interface com o usuário possa ser realizada através de um microcomputador compatível com a linha PC.

O programa computacional OSCILOS permite realizar a aquisição de até quatro canais simultaneamente, com um tempo máximo de amostragem de 5 s a uma frequência de aquisição de 4 kHz. Entretanto, para que se conseguisse um tempo de aquisição maior de 20 s, a frequência de aquisição foi ajustada para 1 kHz, frequência esta considerada suficiente para o estudo proposto. De forma a se obter uma melhor visualização dos oscilogramas gerados, os dados obtidos foram posteriormente exportados para arquivos de formato texto e processados no programa “ORIGIN”.

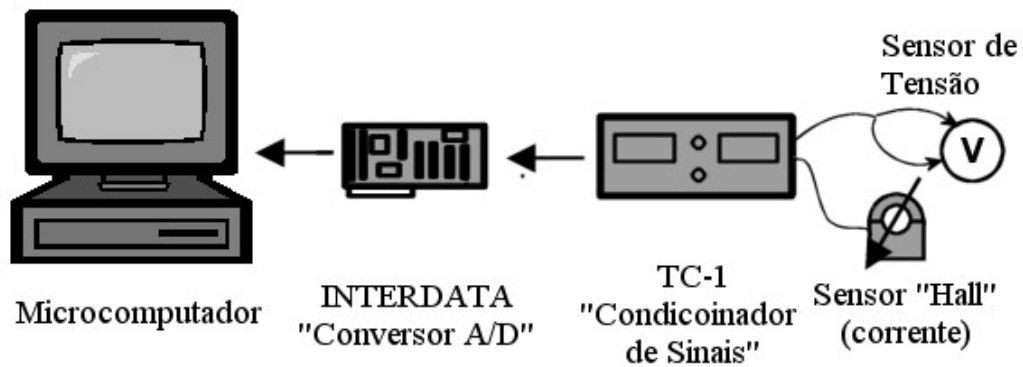


Figura 4.3 – Sistema de medição INTERDATA-TC-1.

4.3 Bancada de Desenvolvimento

A figura 4.4 apresenta a disposição dos equipamentos utilizados na ‘Bancada de Desenvolvimento’.



Figura 4.4 – Disposição dos equipamentos utilizados na ‘Bancada de Desenvolvimento’.

Sendo:

- 1 - Sistema de deslocamento automático da tocha de soldagem “Tart flope-V2”;

- 2 - Fonte de soldagem ‘Inversal -300’;
- 3 - Sistema de medição das variáveis de soldagem TC-1;
- 4 - Microcomputador para aquisição de sinais (‘Pentium I - 100 MHz’);
- 5 - ‘Drivers’ de controle dos motores de passo do ‘Tartílope -V2’;
- 6 - Microcomputador para controle do ‘Tartílope -V2’ (‘486DX4 - 100 MHz’);
- 7 - Tocha reta de soldagem marca ‘Binzel -MP501’;
- 8 - Mesa para a fixação dos corpos-de-prova e realização dos ensaios.

O diagrama da figura 4.5 mostra de forma simplificada os principais módulos constituintes da bancada e o fluxo de informações entre eles. As linhas tracejadas indicam o fluxo principal responsável pelo funcionamento do sistema de seguimento de junta. Percebe-se que essas linhas formam um ciclo fechado entre a ‘Unidade Central de Processamento’ (UCP) (‘Programa de Controle’), o ‘Tartílope -V2’ e o sistema de aquisição de dados (Sensor ‘Hall’ e TC -1). Tal característica, comum aos sistemas ditos de malha-fechada, ou realimentados, possibilita que o programa de controle obtenha informações do processo em tempo real.

Para esse estudo, além do sinal da corrente média, também foram aquisitados os sinais da corrente instantânea, da tensão de soldagem e o sinal que indica o instante em que o sistema realiza a aquisição da corrente média. Os três primeiros sinais são lidos diretamente do TC-1 que, por sua vez, está conectado aos dois microcomputadores da bancada. O quarto sinal foi gerado através de uma implementação no programa de controle. Quando é identificado que a tocha encontra-se numa das extremidades da junta, ou seja, no momento da leitura da corrente média, o programa de controle efetua uma troca no nível DC de uma saída da porta paralela do microcomputador. Essa saída foi então conectada diretamente na entrada de um canal da placa INTERDATA que está conectada no microcomputador utilizado para aquisição dos sinais. Assim, através do programa ‘OSCILOS’, pôde -se obter a combinação dos sinais proveniente do TC-1 e da ‘UCP’.

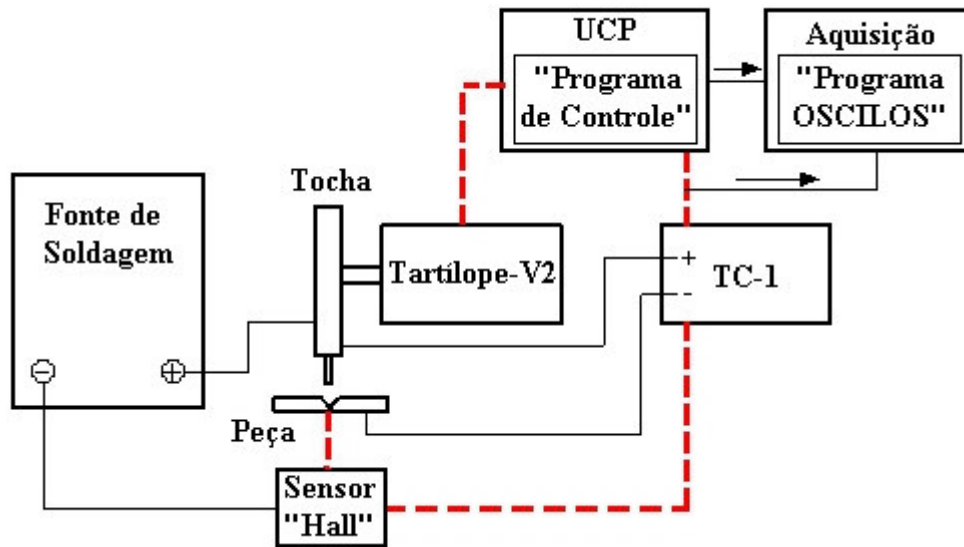


Figura 4.5 – Diagrama dos principais módulos da ‘Bancada de Desenvolvimento’ e o fluxo de informações entre eles.

4.4 Bancada de Avaliação

A bancada de avaliação, figura 4.6, foi composta de um robô industrial (1), suas unidades de aquisição (2) e controle (3) (malha-fechada), e uma fonte de soldagem “Inversal - 300” (4). Excetuando-se a fonte de soldagem, todos os demais equipamentos foram fornecidos pela mesma empresa.

O robô apresenta seis graus de liberdade e pode ser programado, tanto através de um controle remoto, como através de um microcomputador (necessita aquisição de “software” adicional).

A tocha de soldagem utilizada foi a mesma da ‘Bancada de Desenvolvimento’, a qual fora fixada na extremidade do braço do robô.

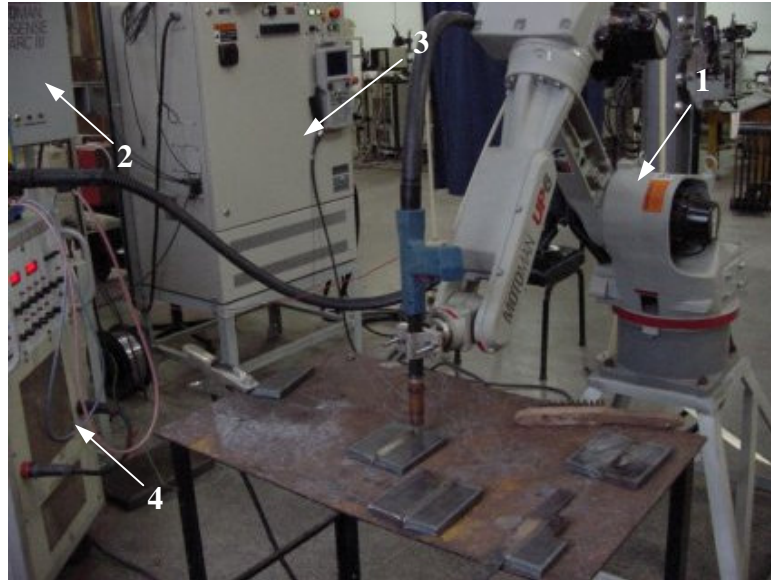


Figura 4.6 – Disposição dos equipamentos utilizados na “Bancada de Avaliação”.

CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais e Métodos Utilizados na Determinação do Algoritmo de Controle

Dentre os vários módulos constituintes do sistema de seguimento de junta guiado pelo arco, o algoritmo de controle possui destacada importância. Sua principal função é realizar o tratamento dos dados de entrada, valores da corrente média, de modo a informar ao sistema de controle a necessidade de efetuar correções na trajetória da tocha.

5.1.1 Descrição da Estrutura Principal do Algoritmo de Controle

Como já visto no capítulo 2, item 2.3.1 ‘Princípio de Funcionamento do Sistema’, o sistema de seguimento de junta baseia-se na diferença entre os valores da corrente de soldagem nas extremidades da junta para determinar possíveis erros de alinhamento do conjunto tocha-peça. A figura 5.1 apresenta o fluxograma de controle mais simples que se pode obter para o sistema.

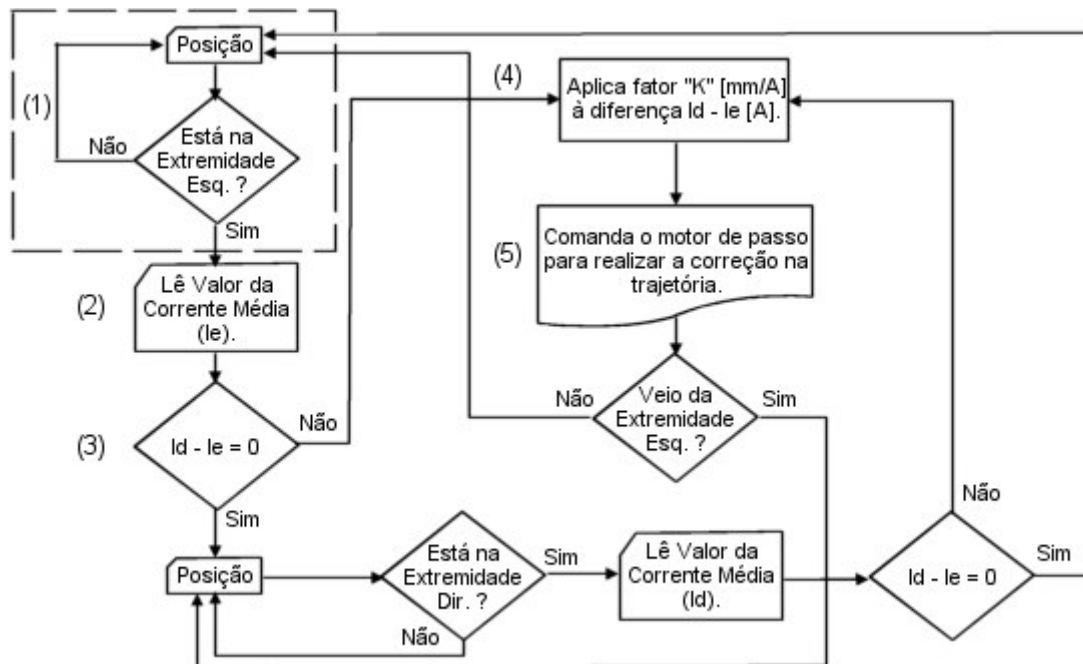


Figura 5.1 – Algoritmo de controle geral dos sistemas de seguimento de junta guiados pelo arco.

Através da leitura do posicionamento da tocha, é possível identificar o instante em que esta se encontra em uma das extremidades da junta, figura 5.1 (1) (ver figura 2.8a). Neste instante, o sistema de controle realiza a leitura do valor da corrente média de soldagem (2). No próximo passo, a diferença entre os valores lidos nas extremidades é calculada (3) e, caso essa diferença seja diferente de zero, o valor da correção é determinada (4). É importante observar que, na prática, essa diferença dificilmente será zero devido à flutuação do sinal da corrente média de soldagem. Para que essa diferença das correntes [A] lidas seja transformada em deslocamento [mm], deve-se aplicar um fator de correção ‘K’, cuja unidade é [mm/A]. Finalmente, o sistema de controle recebe essa informação e comanda o motor de passo (5) de modo a efetuar a correção necessária.

5.1.2 Metodologia Experimental

Partindo-se de condições pré-determinadas de soldagem (tabela 5.1), com a fonte de soldagem ajustada para trabalhar no modo de comando de tensão, utilizou-se a ‘Bancada de Desenvolvimento’ (item 4.3) para se testar três variações do algoritmo apresentado.

Tabela 5.1 – Parâmetros de soldagem empregados nos ensaios de determinação do algoritmo de controle

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Tensão de Soldagem (V) | 22,0 |
| Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s) (AWS ER70S-6 de Ø 1,0 mm) | 83,3 ⁽¹⁾ |
| Velocidade de Soldagem (mm/s) | 2,5 ⁽²⁾ |
| Vazão de Gás ($\times 10^{-3}$ m³/s) (85% Ar + 15% CO ₂) | 0,21 ⁽³⁾ |
| Frequência de Tecimento (Hz) | 1,5 |
| Amplitude de Tecimento (mm) | 8 |
| Distância Bico-de-Contato Peça (mm) | 25 |

⁽¹⁾ Va = 5,0 m/min ; ⁽²⁾ Vs = 15 cm/min ; ⁽³⁾ Vg = 12,5 l/min

Para atestar a funcionalidade de cada algoritmo, os corpos-de-prova foram posicionados de forma que a linha central de soldagem apresentasse um desvio de 10° (θ) em relação à linha central de tecimento, figura 5.2. Os ensaios foram realizados na posição plana.

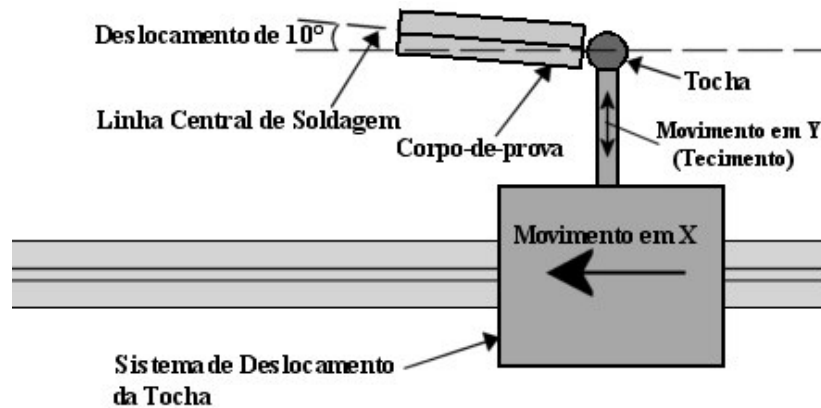


Figura 5.2 – Desenho esquemático da configuração da bancada experimental utilizada para os testes de funcionalidade dos algoritmos de controle.

Os corpos-de-prova utilizados foram confeccionados a partir de perfis em ‘L’ de aço ABNT-1020, apresentando dimensões de 200 mm de comprimento, 25,4 mm de abas e 6,35 mm de espessura.

Dois ensaios foram conduzidos para cada variante do algoritmo de controle. Os resultados foram analisados considerando-se o aspecto visual do cordão, o gráfico da trajetória descrita pela tocha e o gráfico dos valores das correções efetuadas. Também foram adquiridos os sinais da corrente instantânea, corrente média e o sinal que retrata o instante em que o sistema lê o valor da corrente média.

A primeira implementação (“Algoritmo I”) apresenta apenas uma modificação em relação ao algoritmo apresentado no item anterior. Essa modificação consiste na implementação de limites para os valores de correção. Esses limites visam evitar que o sistema efetue correções muito grandes ou muito pequenas, as quais não podem ser atribuídas ao erro de alinhamento do conjunto tocha-peça, mas, sim, à flutuação do sinal da corrente média. Dessa forma, caso o valor calculado para a correção (De) esteja fora da faixa estabelecida, que nesse caso teve o limite inferior de 0,2 mm e o limite superior de 2,0 mm, o sistema desconsiderará essa informação, figura 5.3.

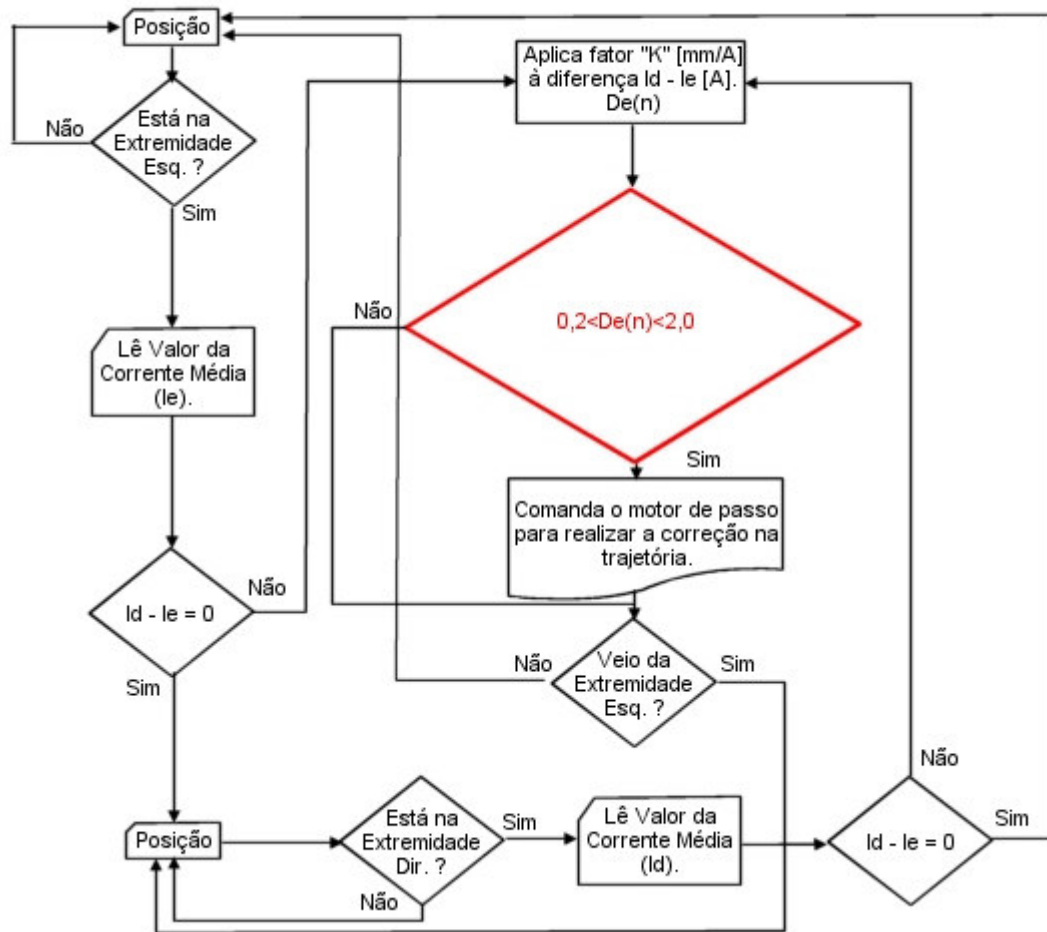


Figura 5.3 – Algoritmo I

Na segunda variação testada, designada por “Algoritmo II”, implementou -se mais uma condição para que o sistema efetue a correção calculada. Nesse caso, o sistema só efetuará a correção atual se as duas correções anteriores tiverem sido para o mesmo lado da junta. Essa implementação visa impedir que ocorram correções para o lado errado da junta. Também foi diminuído o limite superior dos valores de correção, que ficou em 1,0 mm, figura 5.4. Nota-se que, para essas duas variações apresentadas, as correções são efetuadas a cada extremidade do movimento de tecimento.

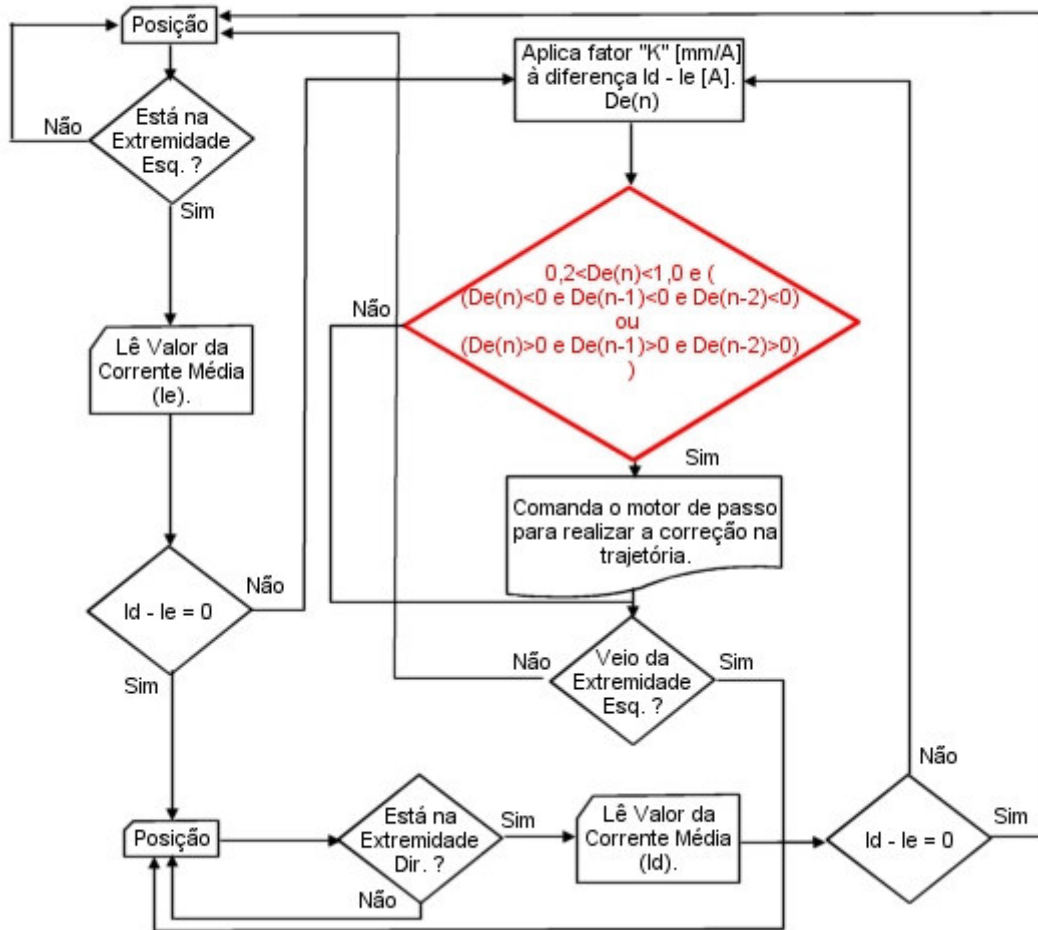


Figura 5.4 – Algoritmo II

Na última variação testada (“Algoritmo III”), a modificação ficou por conta da forma com que as correções foram calculadas. Nesse caso, a correção efetuada pelo sistema foi a média das duas últimas correções calculadas e, portanto, o sistema só efetuava correções a cada duas correções calculadas, ou seja, a cada duas extremidades do movimento de tecimento, figura 5.5.

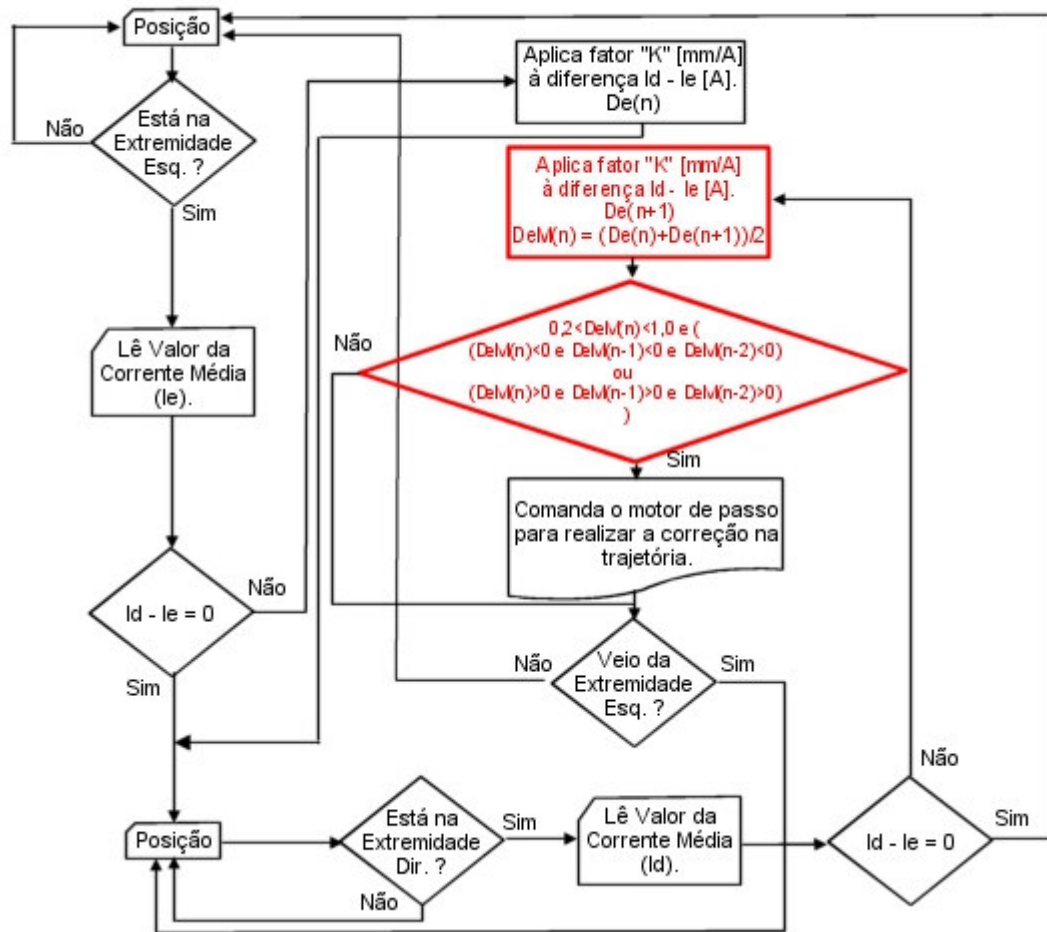


Figura 5.5 – Algoritmo III

A codificação dos experimentos é mostrada na tabela 5.2, onde o algarismo romano indica a variação do algoritmo correspondente, e a letra distingue as replicações dos ensaios. É importante observar que as funções foram implementadas/modificadas de forma acumulativa, ou seja, o algoritmo empregado no ensaio III possui todas as funções descritas anteriormente para os algoritmos I e II.

Tabela 5.2 – Codificação dos ensaios de determinação do algoritmo de controle.

| Ensaio | Funções Implementação/Modificação |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I (A,B) | Limitação dos Valores de Correção ($L_i = 0,2$ mm e $L_s = 2,0$ mm), Correções a Cada Extremidade do Movimento de Tecimento. |
| II (A,B) | Verificação do Lado da Correção, Diminuição do Limite Superior ($L_s = 1,0$ mm), Correções a Cada Extremidade do Movimento de Tecimento. |
| III (A,B) | Mudança no Cálculo da Correção (Média), Correções a Cada Duas Extremidades do Movimento de Tecimento. |

Para comprovar a eficiência do algoritmo de controle escolhido e a repetitividade do processo, realizaram-se experimentos onde foram utilizados corpos-de-prova especialmente preparados para essa finalidade (figura 5.6).

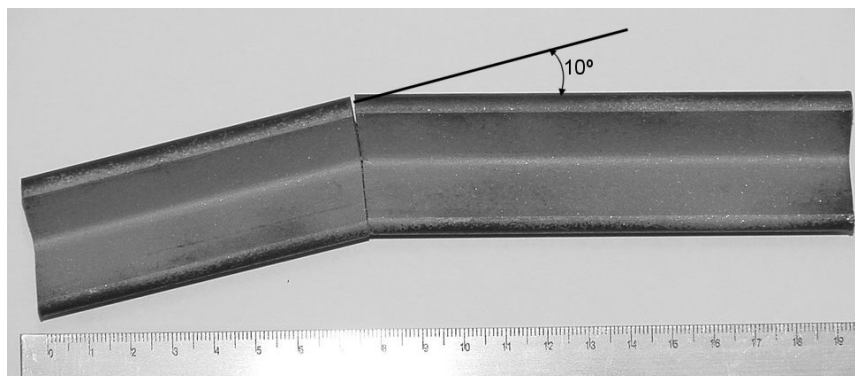


Figura 5.6 – Corpo-de-prova utilizado na comprovação da eficiência do algoritmo de controle.

Os corpos-de-prova, confeccionados a partir de perfis em ‘L’, apresentam um brusco desvio de 10° na sua linha central de soldagem. Dessa forma, pôde-se verificar se realmente o sistema é capaz de identificar quando ocorrem ou não desvios durante a soldagem.

Três corpos-de-prova foram ensaiados. Os parâmetros de soldagem utilizados foram os mesmo da tabela 5.1.

5.2 Métodos Empregados na Determinação da Faixa de Operação do Sistema de Seguimento Proposto e no Estudo do Efeito dos Principais Parâmetros de Soldagem no Seu Funcionamento

Utilizando a ‘Bancada de Desenvolvimento’, realizaram -se ensaios com o propósito de se determinar uma faixa de operação do sistema de seguimento de junta proposto. Para isso, procurou-se analisar o efeito das seguintes variáveis:

- Velocidade de Soldagem;
- Frequência de Tecimento;
- Amplitude de Tecimento;
- Valor Médio da Corrente de Soldagem (modo de transferência metálica);
- Ângulo de Desvio da Junta.

Duas baterias de ensaios foram realizadas, sendo uma no modo de transferência por curto-circuito (corrente média de 120 A) e a outra no modo de transferência goticular axial (corrente média de 200 A). A tabela 5.3 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados para os dois modos de transferência metálica.

Tabela 5.3 – Parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios de determinação da faixa de operação do sistema.

| Parâmetros de Soldagem | Modo de Transferência Metálica | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| | Curto-Circuito | Goticular Axial |
| Tensão de Soldagem (V) | 22,0 | 32,0 |
| Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s) (AWS ER70S-6 de Ø 1,0 mm) | 83,3 ⁽¹⁾ | 175,0 ⁽²⁾ |
| Vazão de Gás ($\times 10^{-3}$ m ³ /s) (85% Ar + 15% CO ₂) | 0,21 ⁽³⁾ | 0,21 ⁽³⁾ |
| Distância Bico-de-Contato Peça (mm) | 25 | 25 |

⁽¹⁾ Va = 5,0 m/min ; ⁽²⁾ Va = 10,5 m/min ; ⁽³⁾ Vg = 12,5 l/min

Partindo-se de um conjunto de parâmetros base, os ensaios foram conduzidos de forma que apenas um parâmetro de soldagem fosse modificado por vez. Foram empregadas três

velocidades de soldagem, três frequências de tecimento, três amplitudes de tecimento, e cinco ângulos de desvio.

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam, respectivamente, o projeto dos experimentos para o modo de transferência por curto-circuito e goticular axial. Os ensaios foram codificados da seguinte maneira: a primeira letra indica o parâmetro que está sendo modificado, ou seja, “V” para velocidade de soldagem, “F” para frequência de tecimento, “A” para amplitude de tecimento e “D” para ângulo de desvio da junta. O número que aparece após a letra representa o valor ajustado para o parâmetro multiplicado por 10. A última letra indica o modo de transferência metálica, sendo “C” para curto -circuito e “G” para goticular axial. A linha em destaque (mais escura) nas tabelas apresenta o conjunto de parâmetros utilizado como referencia. Apesar de se tratar de apenas um ensaio, essa linha apresenta quatro codificações distintas de forma a facilitar a discussão dos resultados nos capítulos posteriores.

Tabela 5.4 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência por curto-circuito, utilizado na determinação da faixa de operação do sistema.

| Ensaio | Vs (mm/s) | f (Hz) | A (mm) | θ (graus) |
|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------------|
| V33C | 3,3 | 1,5 | 8 | 10,0 |
| V25C F15C A80C D100C | 2,5 | 1,5 | 8 | 10,0 |
| V17C | 1,7 | 1,5 | 8 | 10,0 |
| F10C | 2,5 | 1,0 | 8 | 10,0 |
| F20C | 2,5 | 2,0 | 8 | 10,0 |
| A60C | 2,5 | 1,5 | 6 | 10,0 |
| A40C | 2,5 | 1,5 | 4 | 10,0 |
| D00C | 2,5 | 1,5 | 8 | 0 |
| D25C | 2,5 | 1,5 | 8 | 2,5 |
| D50C | 2,5 | 1,5 | 8 | 5,0 |
| D150C | 2,5 | 1,5 | 8 | 15,0 |

Tabela 5.5 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência goticular axial, utilizado na determinação da faixa de operação do sistema..

| Ensaio | V_s (mm/s) | f (Hz) | A (mm) | θ (graus) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| V50G | 5,0 | 1,5 | 6,0 | 10,0 |
| V42G F15G A60G D100G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 10,0 |
| V33G | 3,3 | 1,5 | 6,0 | 10,0 |
| F10G | 4,2 | 1,0 | 6,0 | 10,0 |
| F20G | 4,2 | 2,0 | 6,0 | 10,0 |
| A40G | 4,2 | 1,5 | 4,0 | 10,0 |
| A20G | 4,2 | 1,5 | 2,0 | 10,0 |
| D00G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 0 |
| D25G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 2,5 |
| D50G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 5,0 |
| D150G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 15,0 |

Como já descrito, os corpos-de-prova utilizados foram confeccionados a partir de perfis em ‘L’ de aço ABNT -1020, apresentando dimensões de 200 mm de comprimento, 25,4 mm de abas e 6,35 mm de espessura.

Os resultados foram analisados através do aspecto visual do cordão e do gráfico da trajetória descrita pela tocha. Também foram obtidos os oscilogramas da corrente instantânea, corrente média e do sinal que retrata o instante em que foi efetuada a leitura do valor da corrente média.

5.3 Ensaio de Comparação entre o Sistema de Seguimento de Junta Desenvolvido e um Sistema Comercial.

Nessa fase do trabalho, buscou-se realizar uma comparação entre o sistema de seguimento de junta desenvolvido e um sistema comercial. Para isso, utilizou-se o robô industrial disponibilizado na ‘Bancada de Avaliação’.

Para realizar essa análise, foram conduzidos ensaios em que se variou o ângulo de desvio da junta. Procurou-se utilizar os mesmos parâmetros de soldagem empregados no item anterior, entretanto, o sistema de seguimento de junta do robô só funcionou a partir das frequências de 3 Hz para o modo de transferência por curto-circuito e de 2 Hz para o modo de transferência gótica axial. Além disso, foi preciso aumentar a velocidade de soldagem empregada nos ensaios com transferência gótica axial para 6,7 mm/s (40 cm/min).

Dessa forma, duas baterias de testes foram realizadas, uma no modo de transferência por curto-circuito e a outra no modo de transferência gótica axial, ambas com a fonte operando no modo de tensão constante. As variáveis de soldagem utilizadas são as mesmas apresentadas na tabela 5.3.

As tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os respectivos projetos dos experimentos para os dois modos de transferência metálica. Na tentativa de se obter o máximo desvio em que o sistema fosse capaz de seguir a junta, a velocidade de soldagem foi diminuída à medida que se chegava numa situação em que o robô não mais conseguia reconhecer a trajetória.

Tabela 5.6 – Projeto dos experimentos, para o modo de transferência por curto-circuito, utilizado na comparação dos sistemas.

| Ensaio | Vs (mm/s) | f (Hz) | Ângulo (graus) |
|--------|-----------|--------|----------------|
| COMP1 | 2,5 | 3,0 | 2,5 |
| COMP2 | 2,5 | 3,0 | 5 |
| COMP3 | 2,5 | 3,0 | 10 |
| COMP4 | 2,5 | 3,0 | 15 |
| COMP5 | 1,7 | 3,0 | 15 |

Tabela 5.7 - Projeto dos experimentos, para o modo de transferência goticular axial, utilizado na comparação dos sistemas.

| Ensaio | Vs (mm/s) | F (Hz) | Ângulo (graus) |
|--------|-----------|--------|----------------|
| COMP6 | 6,7 | 2,0 | 2,5 |
| COMP7 | 6,7 | 2,0 | 5 |
| COMP8 | 6,7 | 2,0 | 10 |
| COMP9 | 5,0 | 2,0 | 10 |
| COMP10 | 3,3 | 2,0 | 10 |
| COMP11 | 3,3 | 2,0 | 15 |

5.4 Métodos Empregados na Aplicação do Sistema de Seguimento de Junta na Soldagem de Juntas Chanfradas.

Com o intuito de testar a aplicação do sistema de seguimento de junta desenvolvido em situações próximas às encontradas em operações de soldagem reais, foram realizadas duas soldas de topo em juntas chanfradas em “V”. A configuração dos corpos -de-prova é apresentada na figura 5.7.

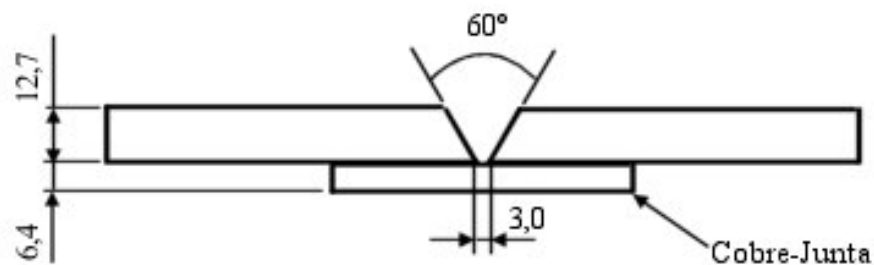


Figura 5.7 – Configuração dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de aplicação do sistema de seguimento de junta na soldagem de juntas chanfradas em “V”.

As juntas foram então posicionadas com um ângulo de desvio de 5° em relação à linha central de tecimento. A figura 5.8 mostra a posição inicial (a) e final (b) da tocha antes do ensaio ser realizado. Percebe-se que a tocha de soldagem, na posição final, encontra-se bem deslocada em relação ao centro da junta. É importante perceber também que a tocha de soldagem foi rotacionada para que o arame-eletrodo ficasse perpendicular à superfície da junta.

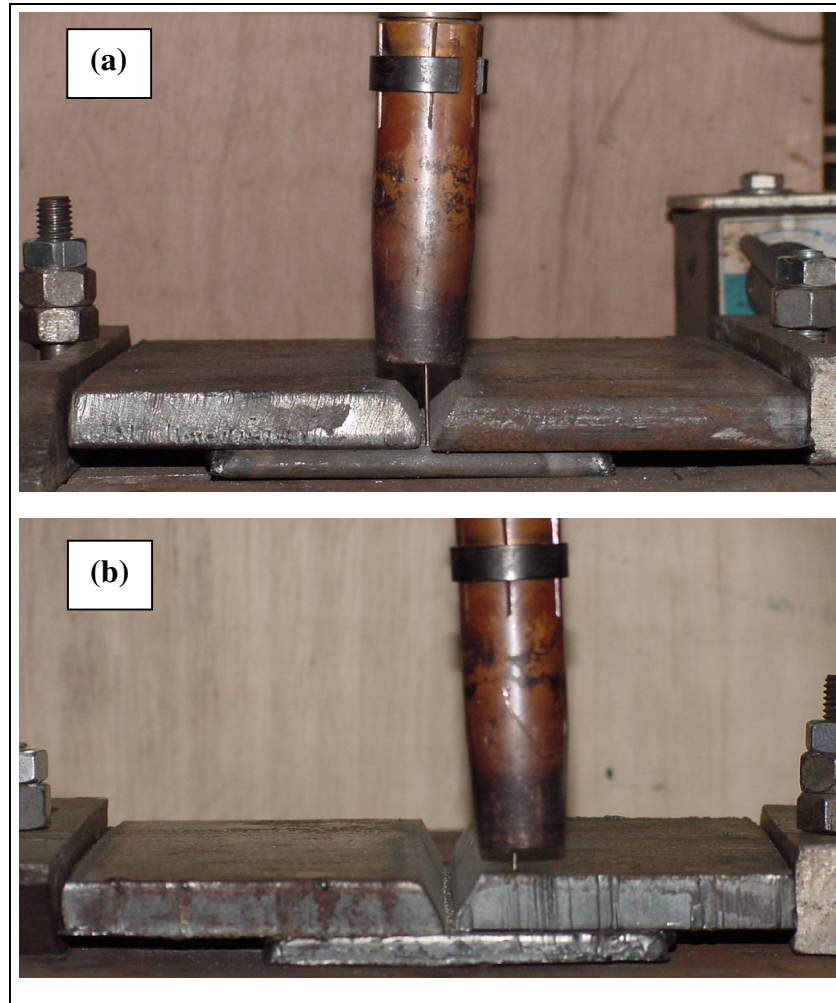


Figura 5.8 – Posição inicial (a) e final (b) da tocha antes do ensaio ser realizado.

Para o primeiro ensaio, designado por ‘JI’, utilizaram -se os mesmos parâmetros de soldagem apresentados na tabela 5.1, com exceção da amplitude de tecimento que foi modificada para 6 mm. Já para o segundo ensaio, designado por ‘JII’, utilizou -se um arame-eletrodo de 1,2 mm de diâmetro. O objetivo de aumentar a bitola do arame-eletrodo foi de se conseguir atingir uma corrente média mais alta, mantendo a transferência por curto-circuito. A tabela 5.8 apresenta os parâmetros de soldagem empregados no segundo ensaio.

Tabela 5.8 – Parâmetros de soldagem empregados no ensaio JII

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Tensão de Soldagem (V) | 24,0 |
| Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s) (AWS ER70S-6 de Ø 1,2 mm) | 100,0 ⁽¹⁾ |
| Velocidade de Soldagem (mm/s) | 3,3 ⁽²⁾ |
| Vazão de Gás ($\times 10^{-3}$ m³/s) (85% Ar + 15% CO ₂) | 0,21 ⁽³⁾ |
| Frequência de Tecimento (Hz) | 1,5 |
| Amplitude de Tecimento (mm) | 6,0 |
| Distância Bico-de-Contato Peça (mm) | 25 |

⁽¹⁾ V_a = 6,0 m/min ; ⁽²⁾ V_s = 20 cm/min ; ⁽³⁾ V_g = 12,5 l/min

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Determinação do Algoritmo de Controle

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam, respectivamente, os gráficos das trajetórias descritas pela tocha de soldagem, os gráficos das correções calculadas pelo sistema, as fotos dos cordões de solda resultantes e os parâmetros empregados nos ensaios ‘IA’ e ‘IB’.

Percebe-se pelos gráficos das trajetórias, figuras 6.1a e 6.2a, e pelas fotos dos cordões de solda, figuras 6.1c e 6.2c, que o sistema conseguiu corrigir a trajetória da tocha em ambos os ensaios. Entretanto, detectou-se a ocorrência de certas instabilidades na trajetória da tocha de soldagem. Os círculos vermelhos nas figuras indicam justamente a posição onde ocorreram tais instabilidades. Nota-se que, nessa posição, a trajetória da tocha sofreu um desvio da linha central de soldagem. Esse fato pode ser explicado observando os respectivos gráficos das correções, os quais mostram, para essa região, uma maior dispersão dos pontos. Essas instabilidades são decorrências de anomalias no sinal da corrente de soldagem que resultam na leitura de valores de corrente média que não refletem o real posicionamento da tocha em relação à junta. No oscilograma apresentado na figura 6.3 é possível observar o que ocorre com o sinal da corrente média quando o processo se torna instável. Observando o sinal do instante em que o sistema efetua a aquisição dos valores da corrente média, percebe-se que as leituras realizadas durante esse período de tempo de instabilidades (aproximadamente 2 s) não são confiáveis para se estimar o posicionamento da tocha, ocasionando valores errôneos de correção.

É importante observar também o valor das correções. No caso do ensaio ‘IA’, nota-se na foto do cordão, figura 6.1c, que o desvio ocorrido na trajetória não foi suficiente para refletir na qualidade do cordão, pelo menos no aspecto visual. Isso se deve ao fato de que os valores das correções erradas, pontos acima da linha vermelha da figura 6.1b, ficaram aproximadamente abaixo de 0,7 mm. Já no ensaio ‘IB’, esses mesmos valores, figura 6.2b, chegaram a aproximadamente 1,2 mm, quase o dobro do ensaio anterior, causando um defeito visível no cordão, figura 6.2c.

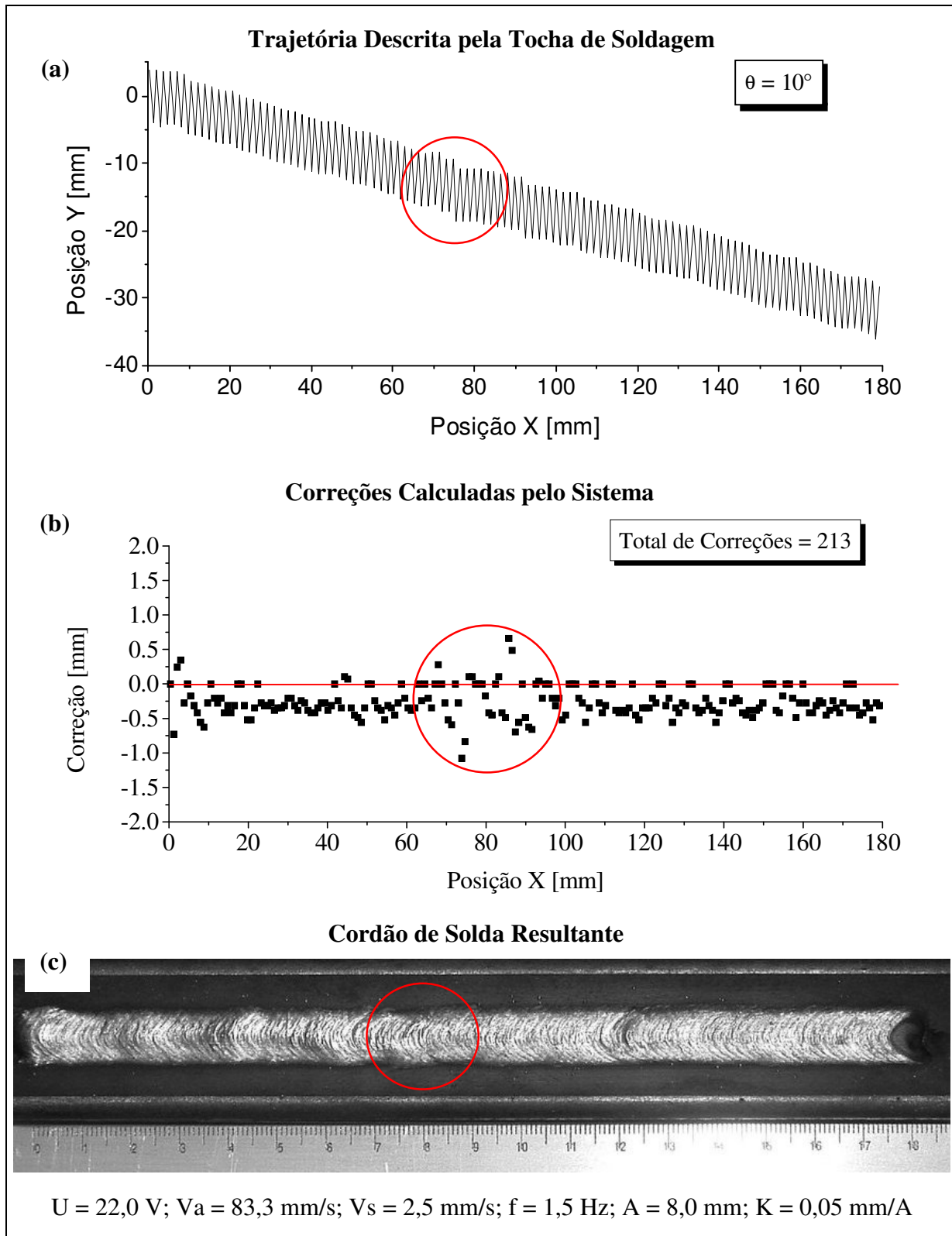


Figura 6.1 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IA” de definição do algoritmo.

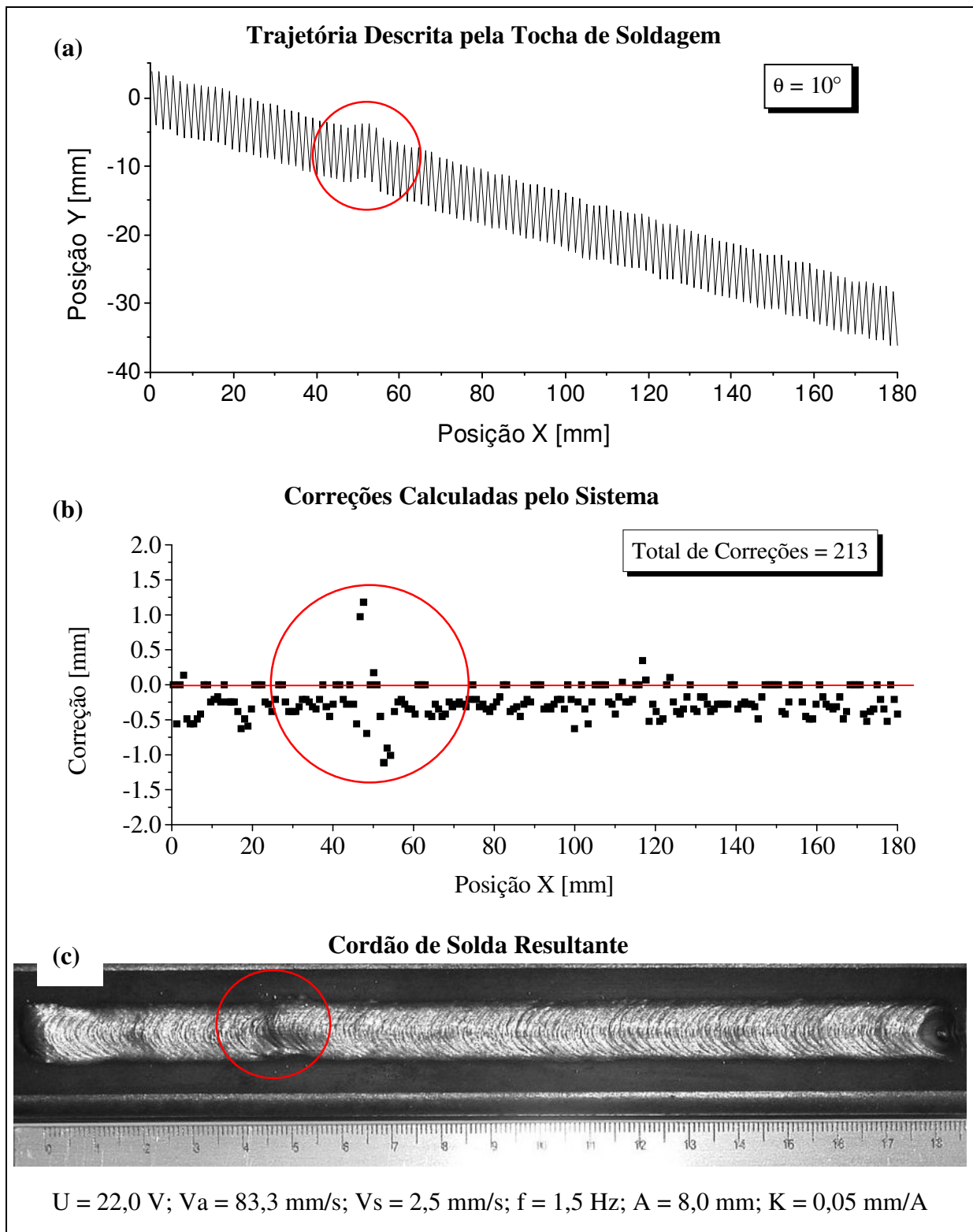


Figura 6.2 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IB” de definição do algoritmo.

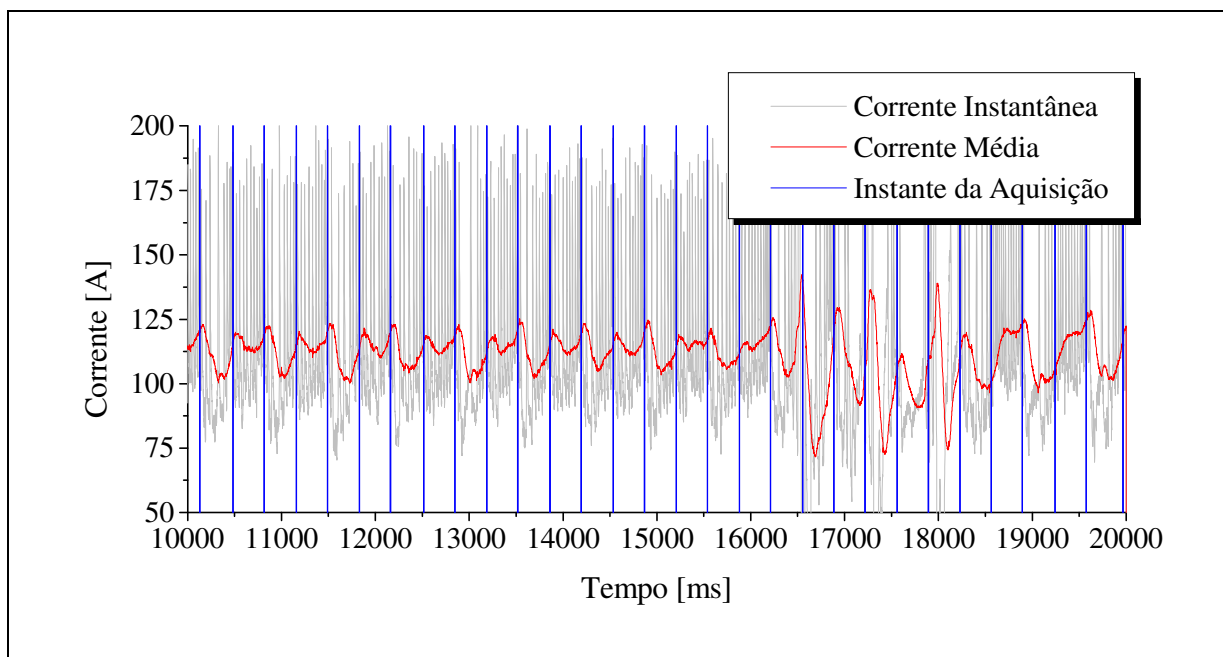


Figura 6.3 – Oscilograma da corrente de soldagem mostrando o que ocorre com o sinal da corrente média durante a ocorrência de uma instabilidade no processo (ensaio ‘IB’).

Duas importantes conclusões a respeito do sistema foram observadas:

- deve-se manter os valores de correção baixos para que o sistema se torne menos sensível a instabilidades no processo de soldagem;
- deve-se evitar que o sistema efetue correções para o lado contrário.

Nesse sentido, as figura 6.4 e 6.5 apresentam os resultados dos ensaios em que se utilizou a segunda variação do algoritmo, ensaios ‘IIA’ e ‘IIB’. Vê-se que os gráficos referentes às trajetórias descritas pela tocha, figuras 6.4a e 6.5a, apresentam uma boa uniformidade, demonstrando que não ocorreram desvios bruscos na trajetória da tocha. Nota-se também que todas as correções efetuadas ficaram abaixo da linha de referência (linha vermelha) das figuras 6.4b e 6.5b, garantindo, assim, que todas as correções foram para o lado correto da junta. Os cordões-de-solda resultantes podem ser vistos nas figuras 6.4c e 6.5c.

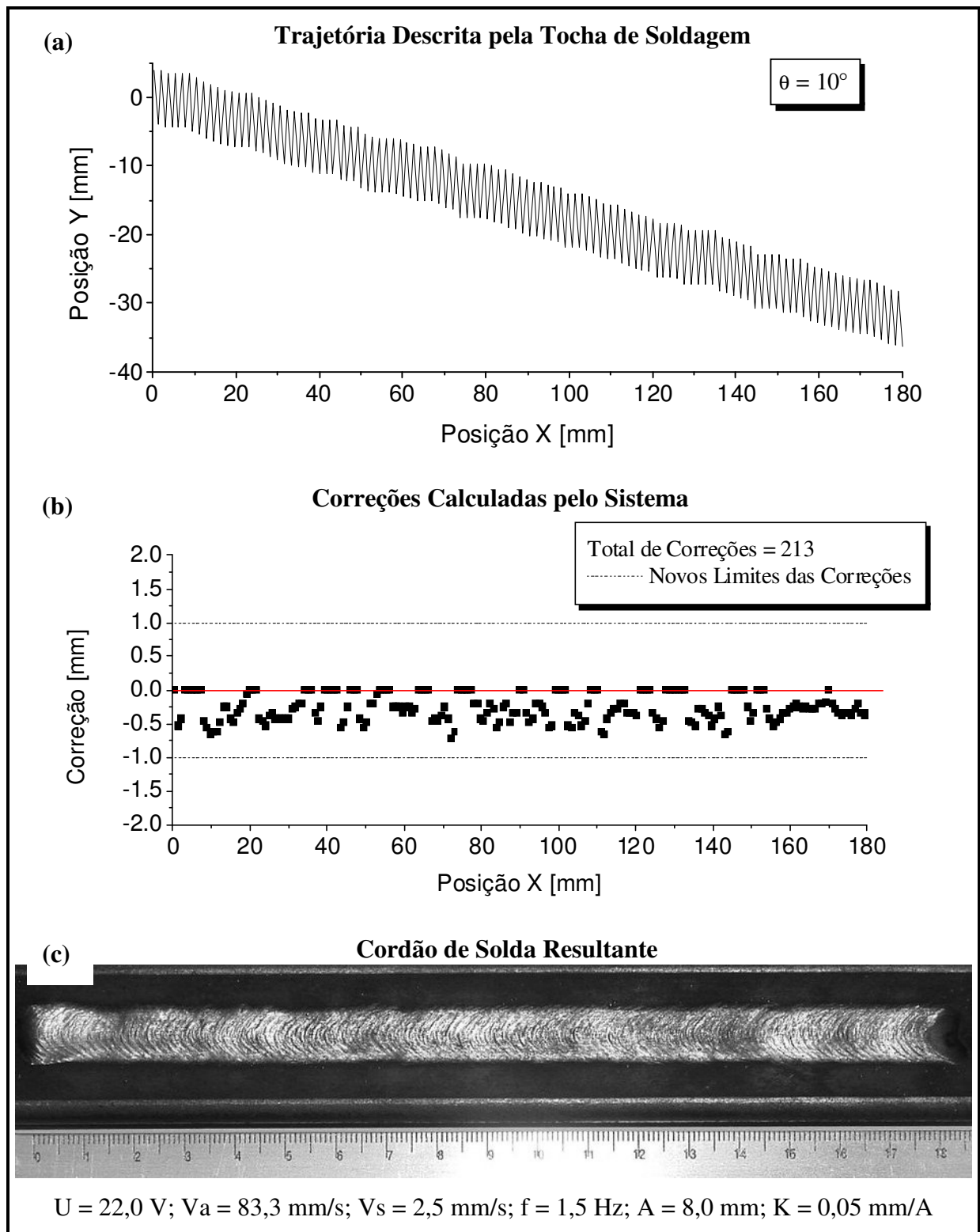


Figura 6.4 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IIA” de definição do algoritmo.

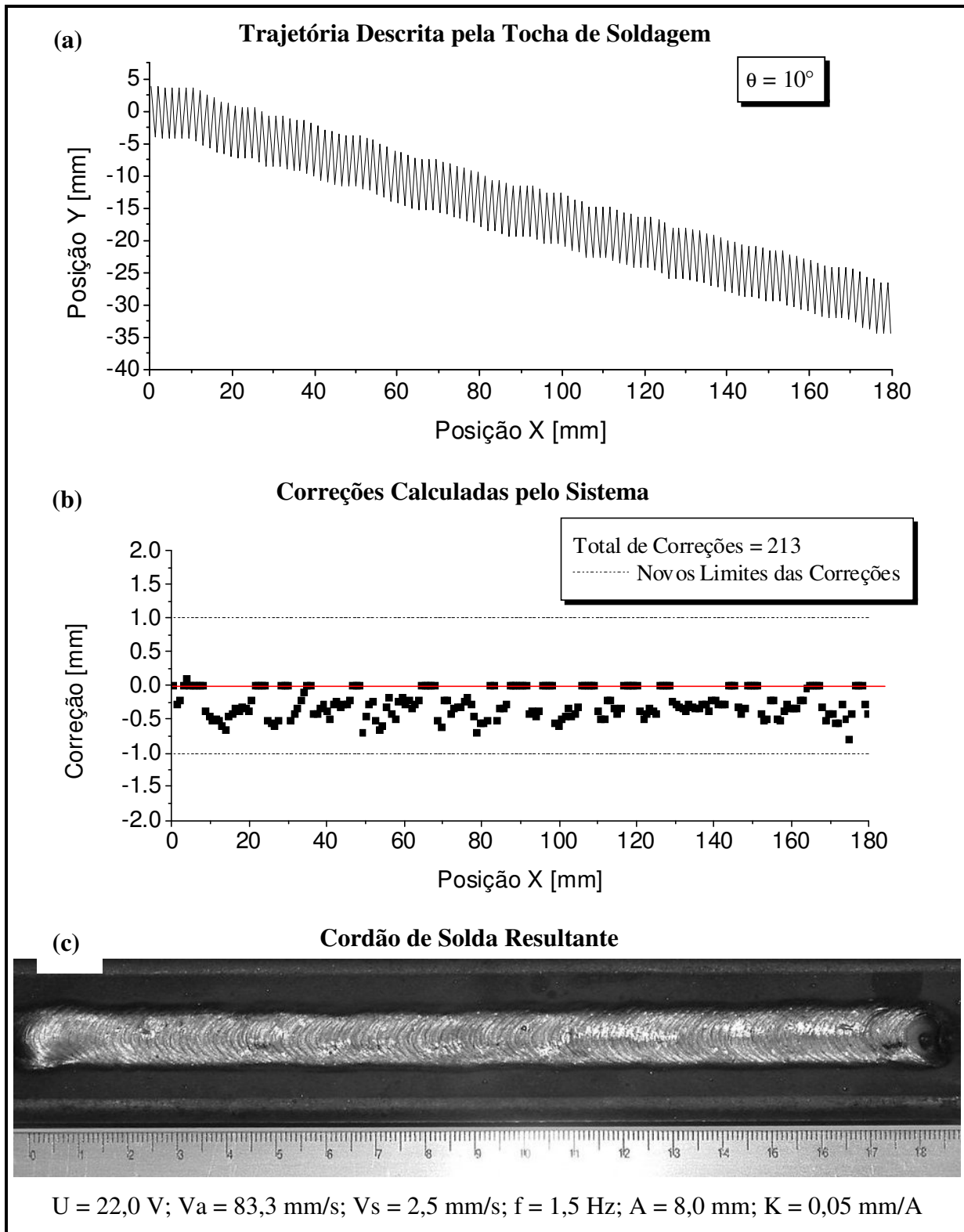


Figura 6.5 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio ‘IIB’ de definição do algoritmo.

Procurando melhorar ainda mais a estabilidade do sistema, através da implementação do cálculo da média de duas correções calculadas, uma terceira variação do algoritmo foi testada. A figura 6.6 apresenta o resultado do ensaio ‘IIIA’. Percebe-se que, apesar do sistema ter conseguido seguir a junta, figura 6.6a, as correções não foram suficientes para manter o cordão de solda centralizado na junta, figura 6.6c. Isso se deve ao fato de que, nessa variação do algoritmo, devido às correções só terem sido efetuadas a cada duas extremidades do movimento de tecimento, o número total de correções foi diminuído pela metade em comparação aos ensaios anteriores, figura 6.6b.

Para compensar esse menor número de correções, um último experimento, em que se reajustou o fator de correção ‘K’ e se aumentou os limites de correção, foi realizado. A figura 6.7 apresenta o resultado desse ensaio (‘IIIB’).

Como se pode perceber, mesmo com a implementação do cálculo da média, o sistema não funciona bem com valores altos de correção, figura 6.7b. O gráfico da trajetória apresenta uma variação considerável, figura 6.7a, resultando num cordão de solda visivelmente instável, figura 6.7c.

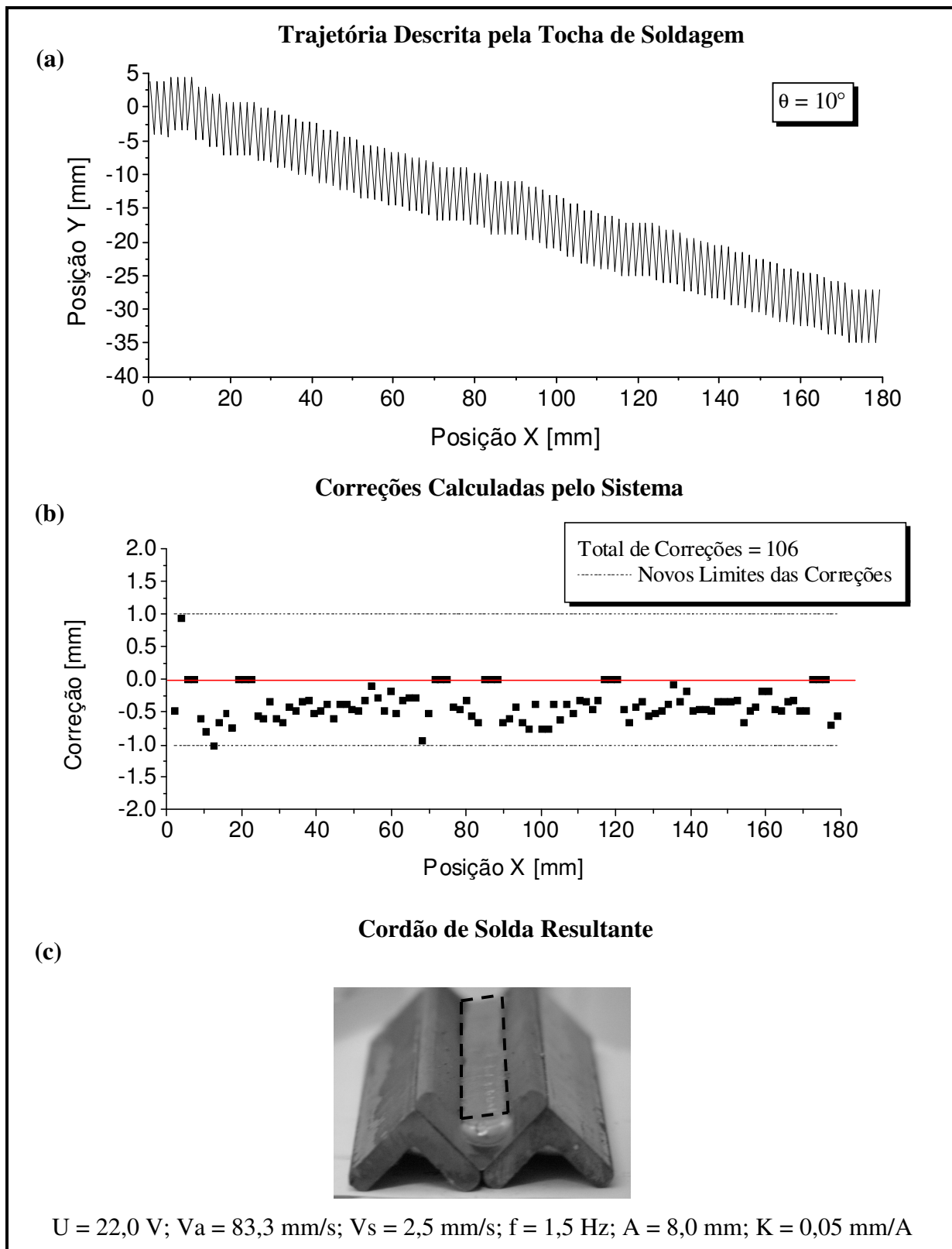


Figura 6.6 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IIIA” de definição do algoritmo.

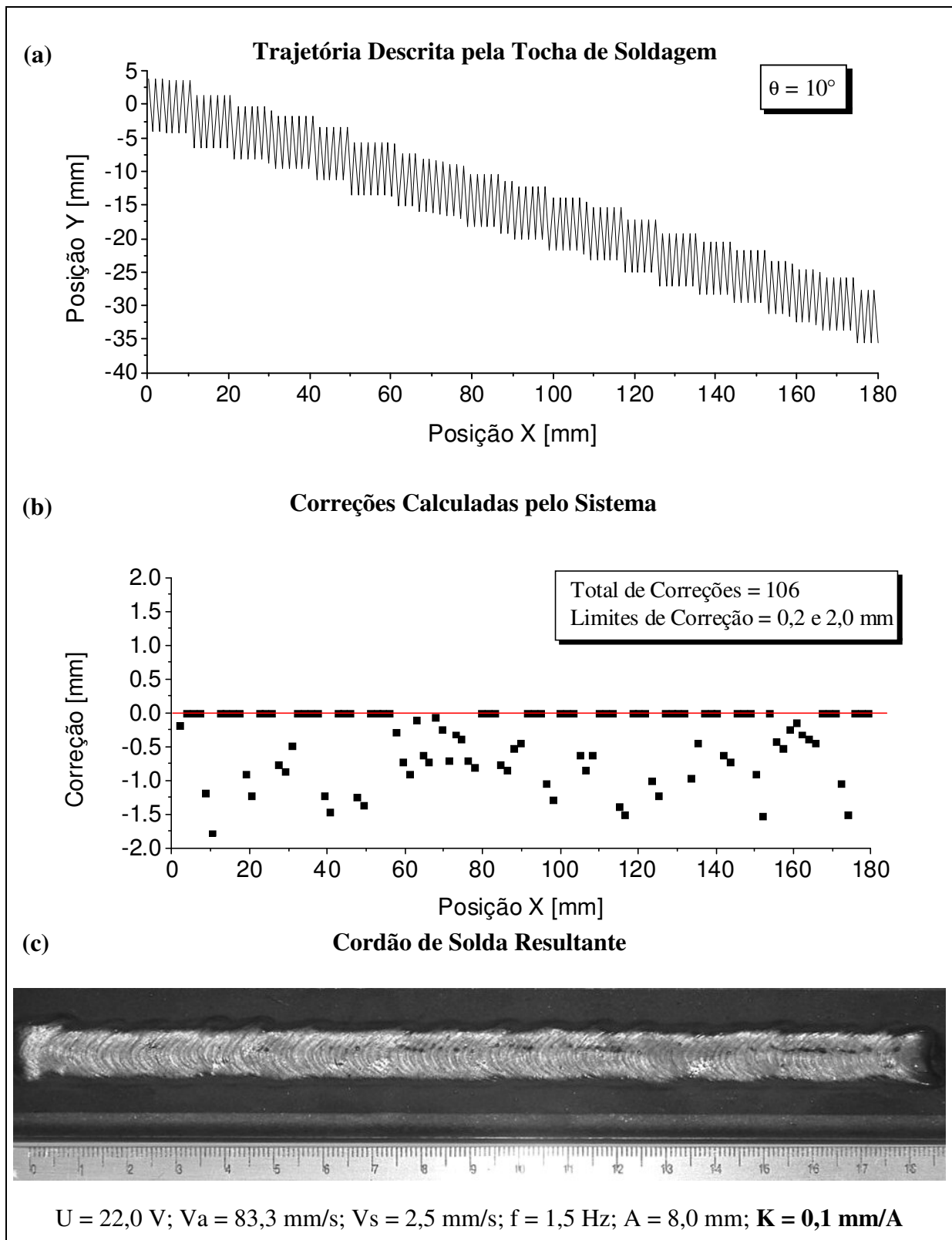


Figura 6.7 – Gráfico da trajetória descrita pela tocha de soldagem (a), gráfico das correções calculadas pelo sistema (b) e foto do cordão de solda resultante (c) para o ensaio “IIIB” de definição do algoritmo.

Baseado nos ensaios, conclui-se que o algoritmo de controle referente à variação ‘II’ foi o mais adequado ao funcionamento do sistema de seguimento de junta proposto. A figura 6.8 apresenta a versão final do algoritmo de controle do sistema.

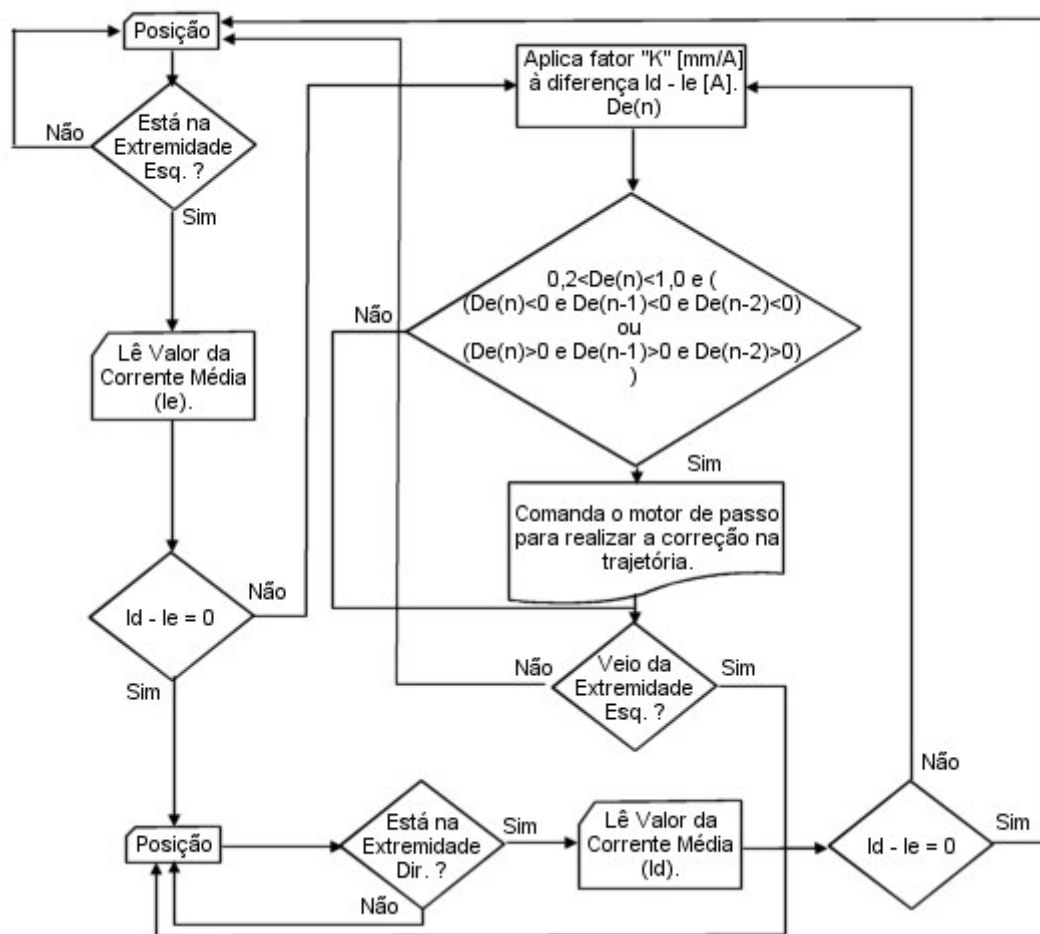


Figura 6.8 – Versão final do algoritmo de controle do sistema. (Ie – corrente média esquerda, Id – corrente média direita, De(n) – *n*-ésimo desvio calculado)

Por fim, a figura 6.9 apresenta o resultado dos ensaios de eficiência do algoritmo de controle. Os resultados obtidos nesses ensaios demonstraram uma boa adequação do algoritmo de controle ao sistema proposto. De uma forma geral, o sistema se mostrou capaz de perceber quando a junta se encontrava alinhada e quando era necessário efetuar correções.

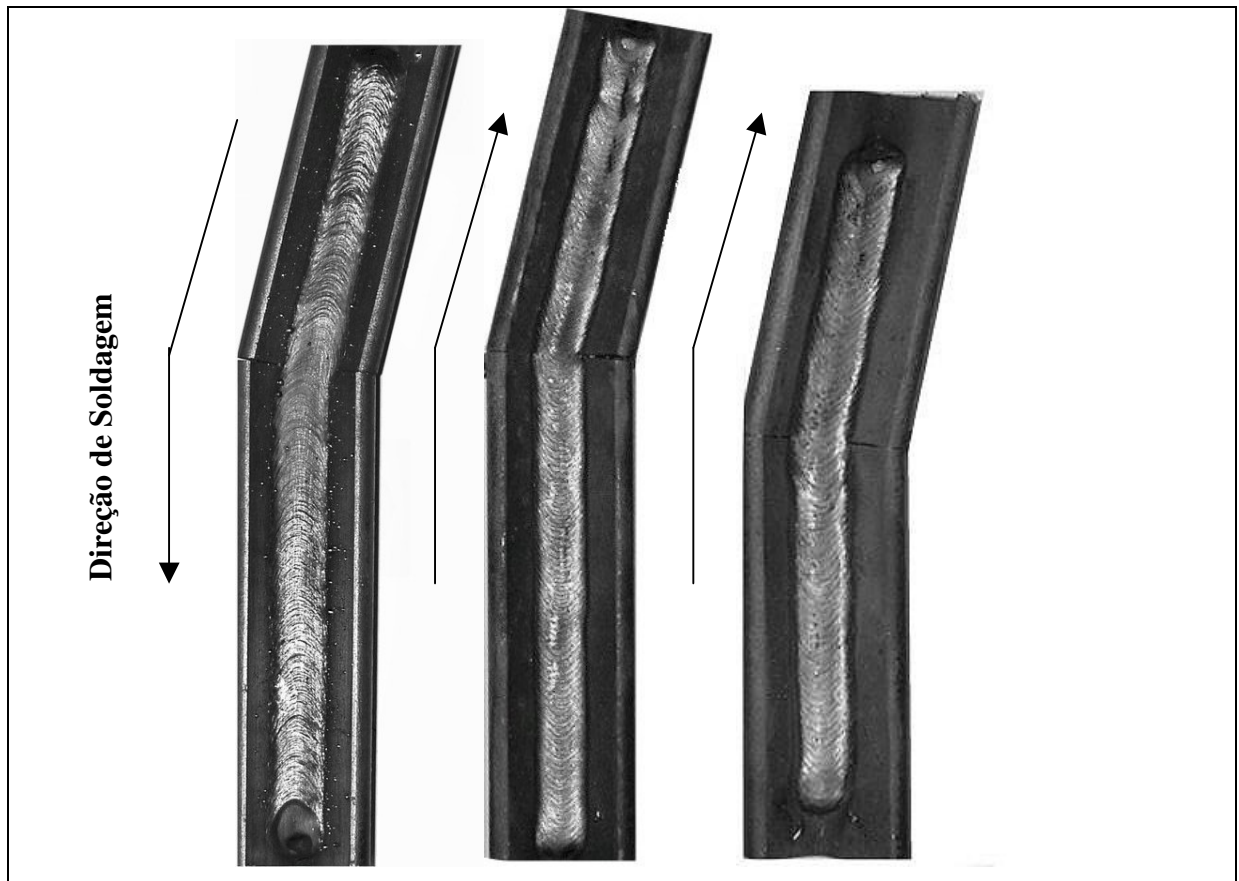


Figura 6.9 – Resultados dos ensaios de eficiência do algoritmo de controle.

6.2 Estudo do Efeito dos Principais Parâmetros de Soldagem no Funcionamento do Sistema de Seguimento de Junta Desenvolvido

As figuras 6.10 e 6.11 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de referência para os modos de transferência por curto-circuito e goticular axial utilizando o algoritmo de controle II.

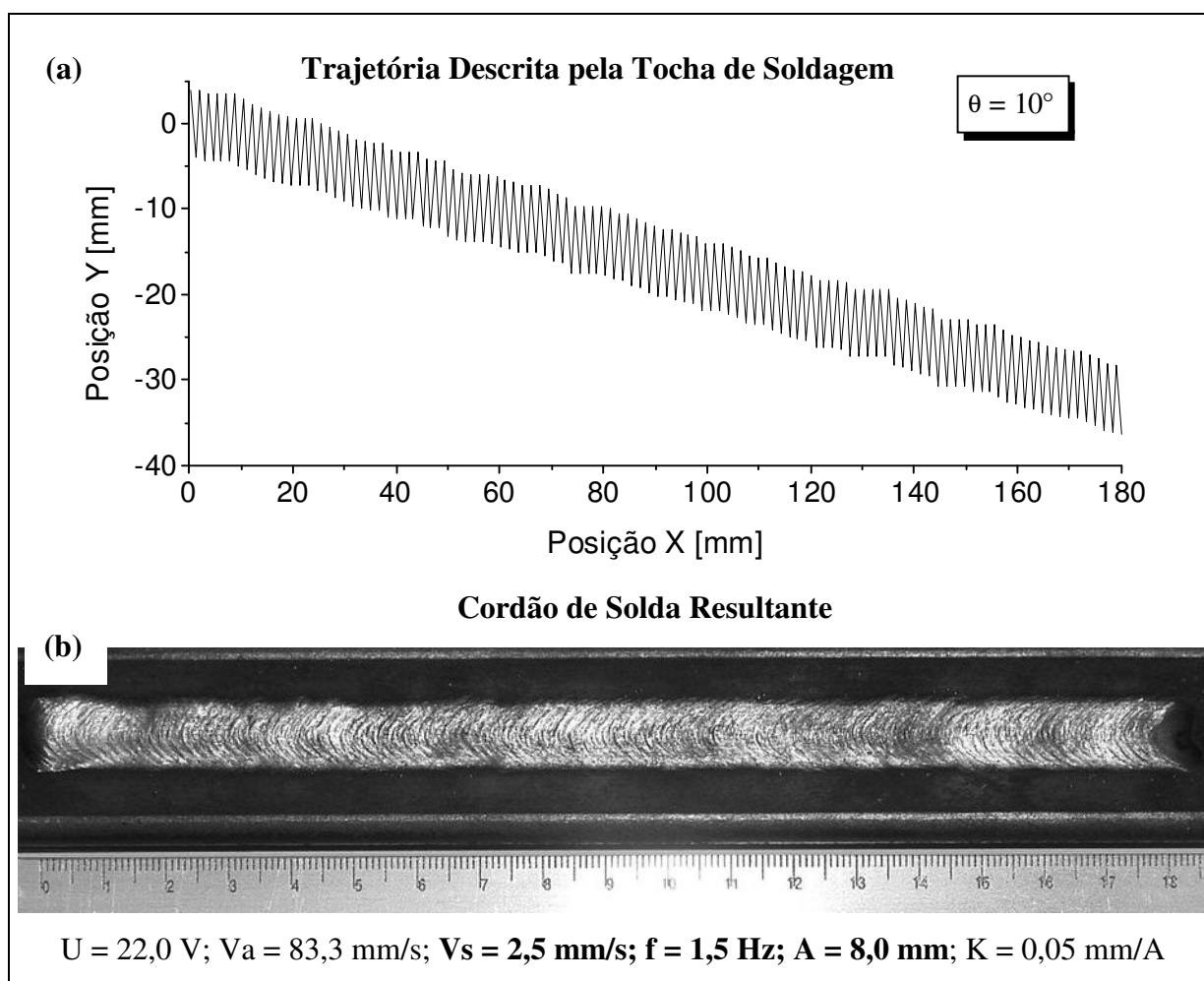


Figura 6.10 – Ensaio de referência para o modo de transferência por curto-circuito (V25C, F15C, A80C e D100C).

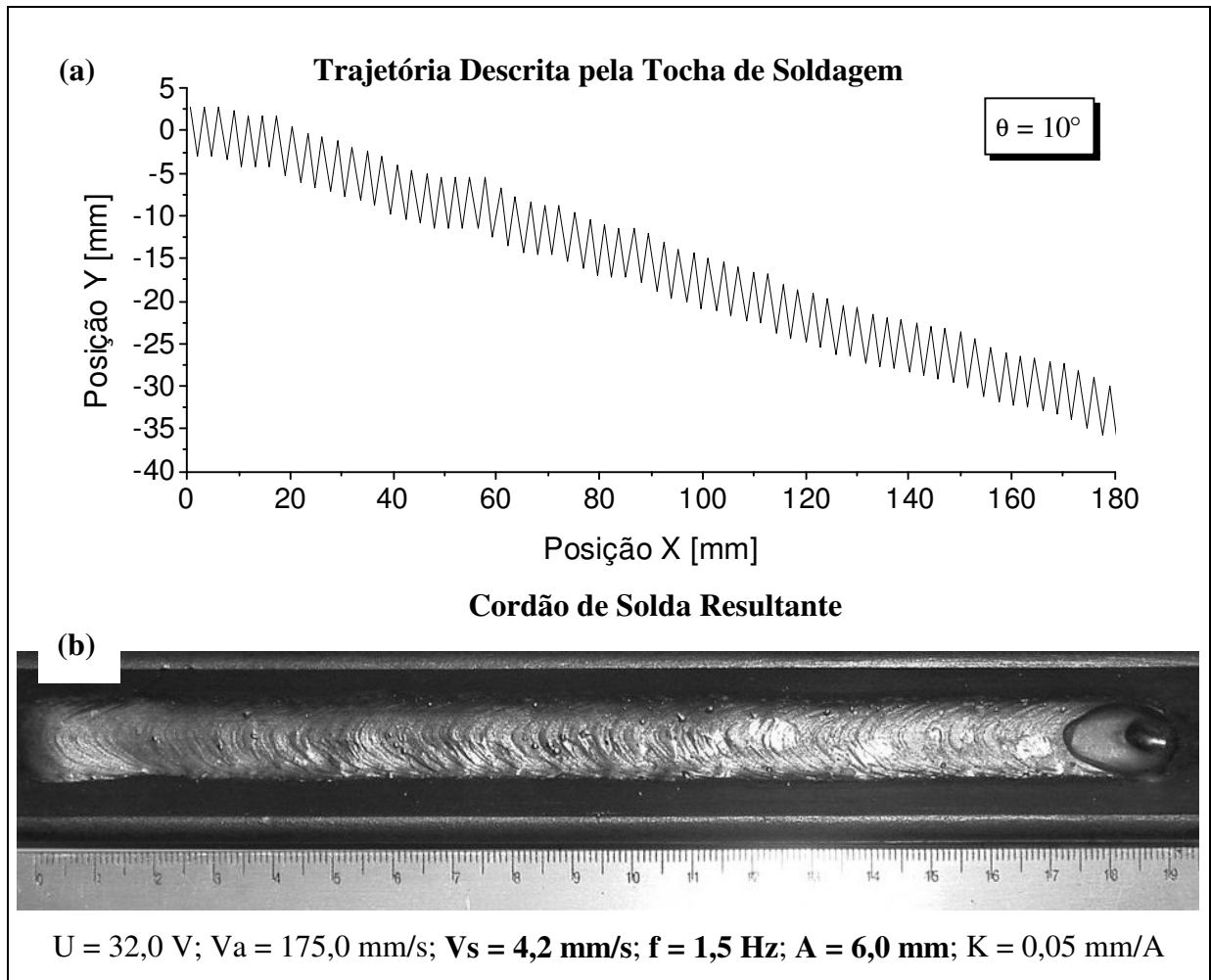


Figura 6.11 – Ensaio de referência para o modo de transferência gótica axial (V42G, F15G, A60G e D100G).

Nota-se pelas fotos dos cordões de solda, figuras 6.10b e 6.11b, que, apesar dos corpos-de-prova terem sido fixados de modo a apresentarem um desvio de 10° em relação à linha central de tecimento, o sistema conseguiu seguir a junta com sucesso. As figuras 6.10a e 6.11a mostram as trajetórias descritas pela tocha em ambos os ensaios. A diferença no número de ciclos de tecimento entre os gráficos das trajetórias da tocha é resultado do aumento da velocidade de soldagem no ensaio com transferência gótica axial.

As figuras 6.12 e 6.13 apresentam os oscilogramas da corrente de soldagem para os ensaios em questão, sendo o primeiro oscilograma para o modo de transferência por curto-circuito e o segundo para o modo de transferência gótica axial.

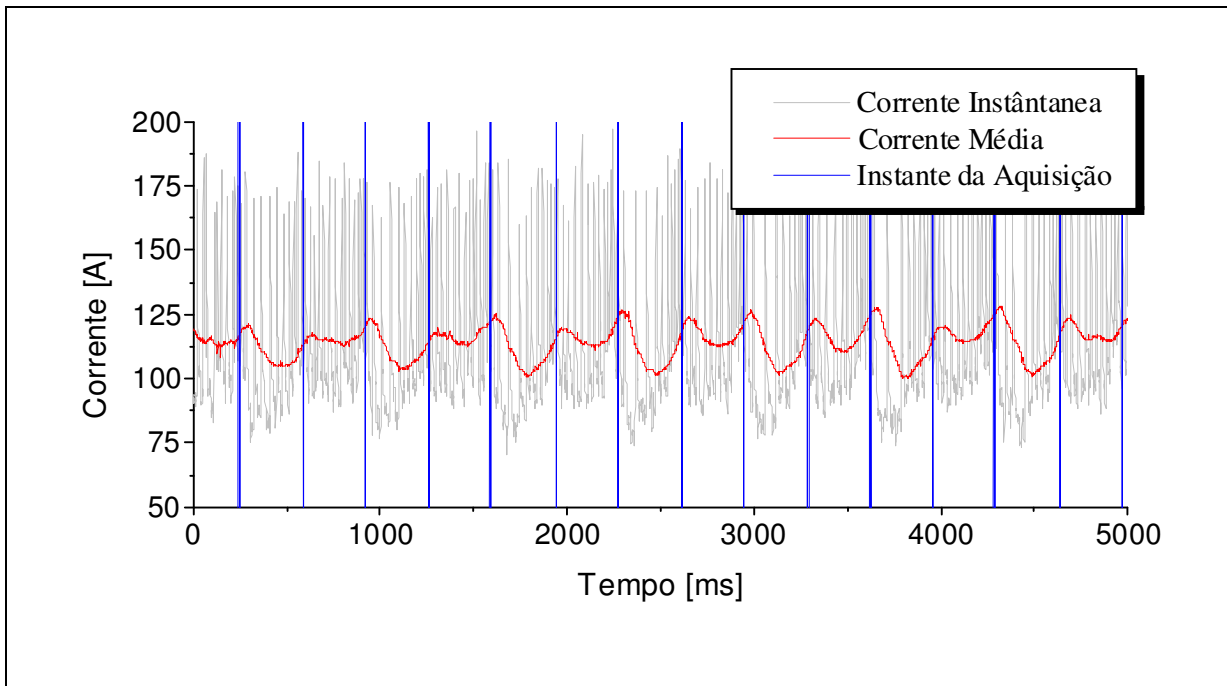


Figura 6.12 – Oscilograma da corrente para a soldagem com tecimento no modo de transferência por curto-circuito.

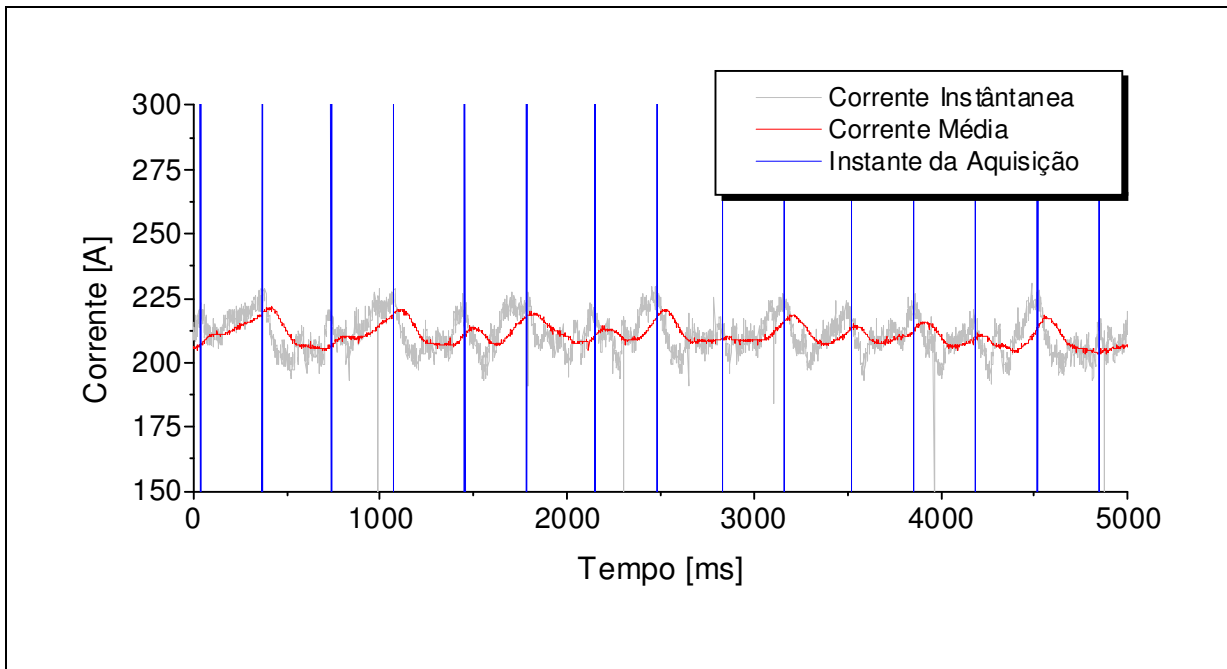


Figura 6.13 – Oscilograma da corrente para a soldagem com tecimento no modo de transferência goticular axial.

Tendo como pontos iniciais os ensaios de referência, buscou-se então realizar uma investigação do efeito da velocidade de soldagem no funcionamento do sistema.

As figuras 6.14 e 6.15 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios em que a velocidade de soldagem foi diminuída em relação aos ensaios de referência, ensaios V17C e V33G.

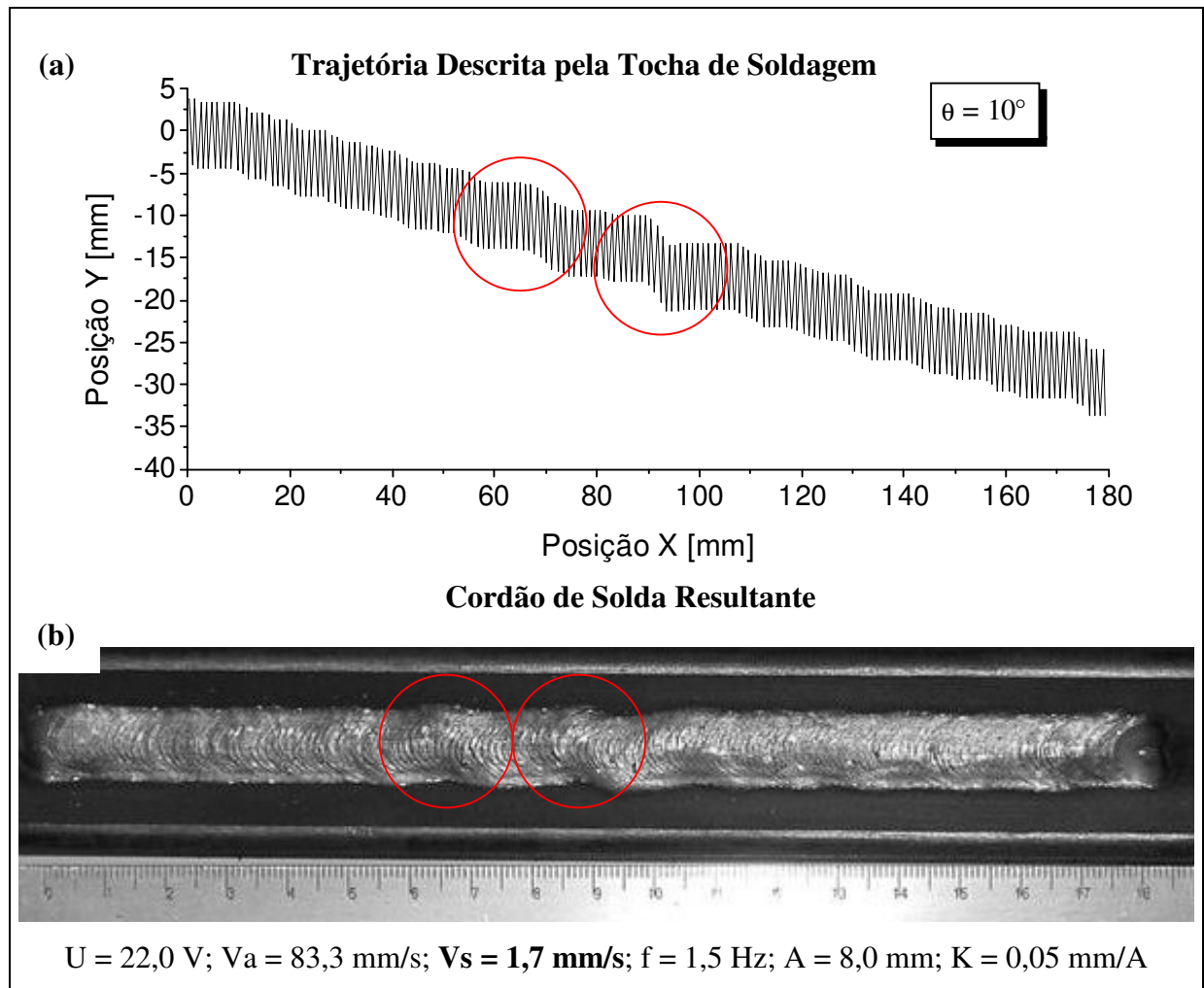


Figura 6.14 – Resultado do ensaio V17C (transferência por curto-circuito).

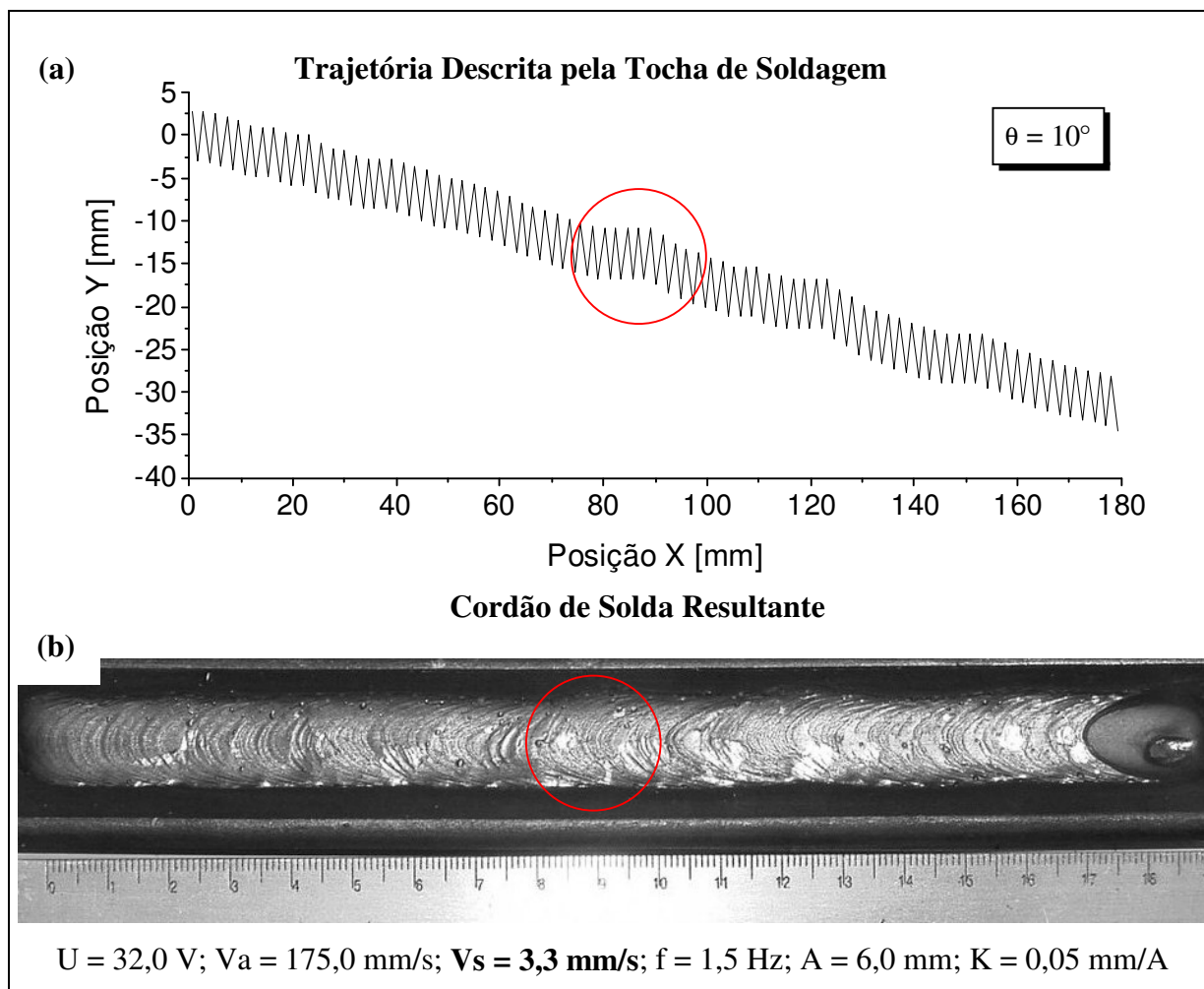


Figura 6.15 – Resultado do ensaio V33G (transferência gótica axial)

Percebe-se que o resultado não foi satisfatório para o ensaio V17C. A figura 6.14a demonstra a ocorrência de instabilidades na trajetória da tocha (círculo vermelho) que resultaram em irregularidades no cordão de solda depositado, figura 6.14b. A explicação para o ocorrido pode ser obtida através do oscilograma da corrente de soldagem apresentado na figura 6.16. Com a diminuição da velocidade de soldagem, a amplitude do sinal da corrente média também diminuiu (ver oscilograma da figura 6.12), resultando num decréscimo da sensibilidade do sistema. A causa dessa diminuição da amplitude do sinal baseia-se no fato do arco voltaico, em baixas velocidades de soldagem, sofrer significativa influência da poça metálica. Assim, o volume da poça metálica formado durante a soldagem aumenta e acaba por interferir no comprimento do arco e, conseqüentemente, no sinal da corrente de soldagem. Sendo assim, o sistema não consegue identificar o erro de alinhamento da junta adequadamente.

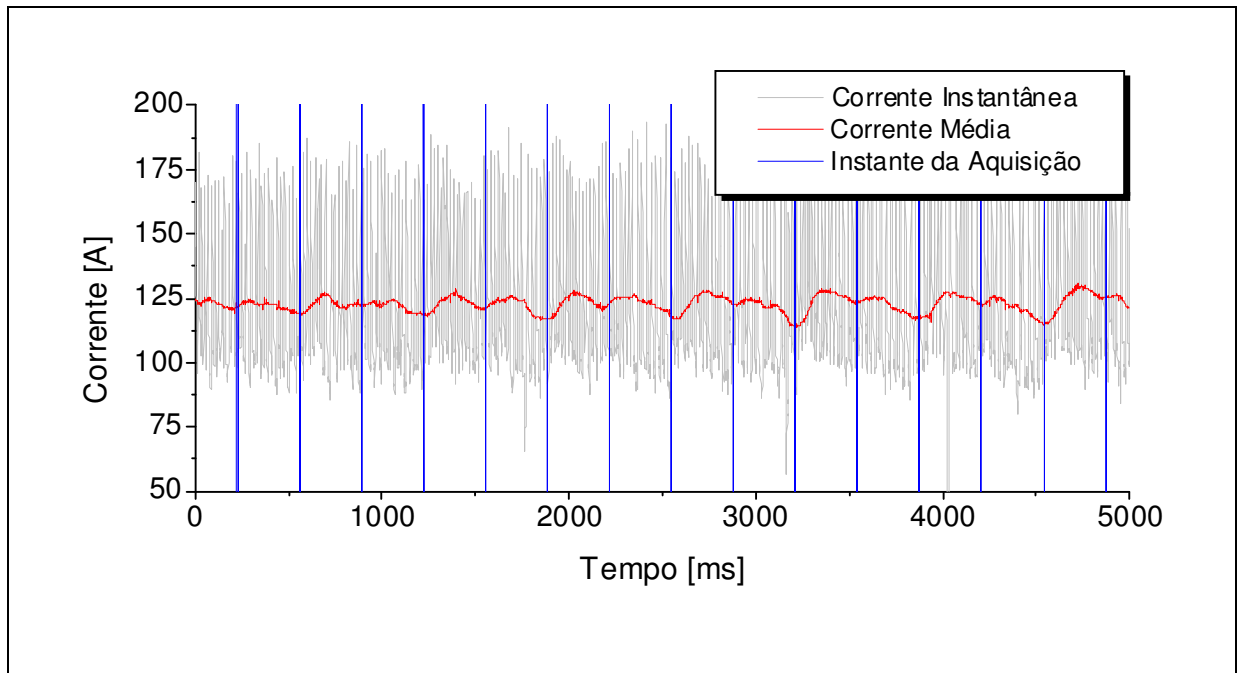


Figura 6.16 – Oscilograma da corrente de soldagem para o ensaio V17C (transferência por curto-circuito).

Já no caso do ensaio V33G, percebe-se que, apesar das instabilidades na trajetória da tocha, não foi possível identificar qualquer alteração no cordão. Como a taxa de deposição é maior no modo de transferência goticular axial, a solda se torna menos sensível às instabilidades na trajetória da tocha.

Nos ensaios V33C e V50G, em que foram empregadas velocidades de soldagem maiores do que nos ensaios de referência, as trajetórias descritas pela tocha apresentaram boa uniformidade, demonstrando que o sistema de seguimento de junta funcionou satisfatoriamente. Entretanto, os cordões apresentaram mordeduras, que foram causadas pelo excesso de velocidade de soldagem, figura 6.17 e 6.18.

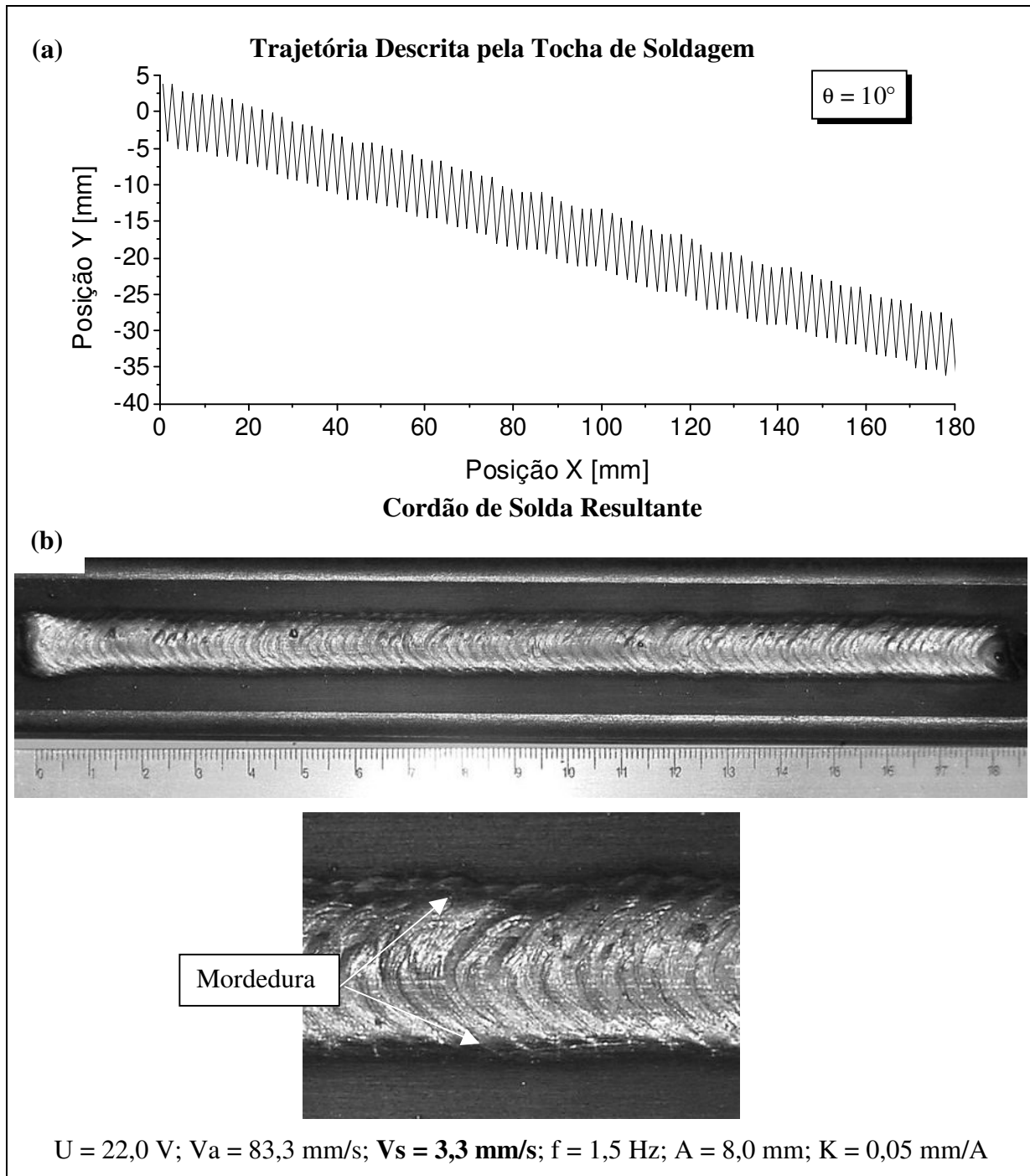


Figura 6.17 – Resultado do ensaio V33C (transferência por curto-circuito).

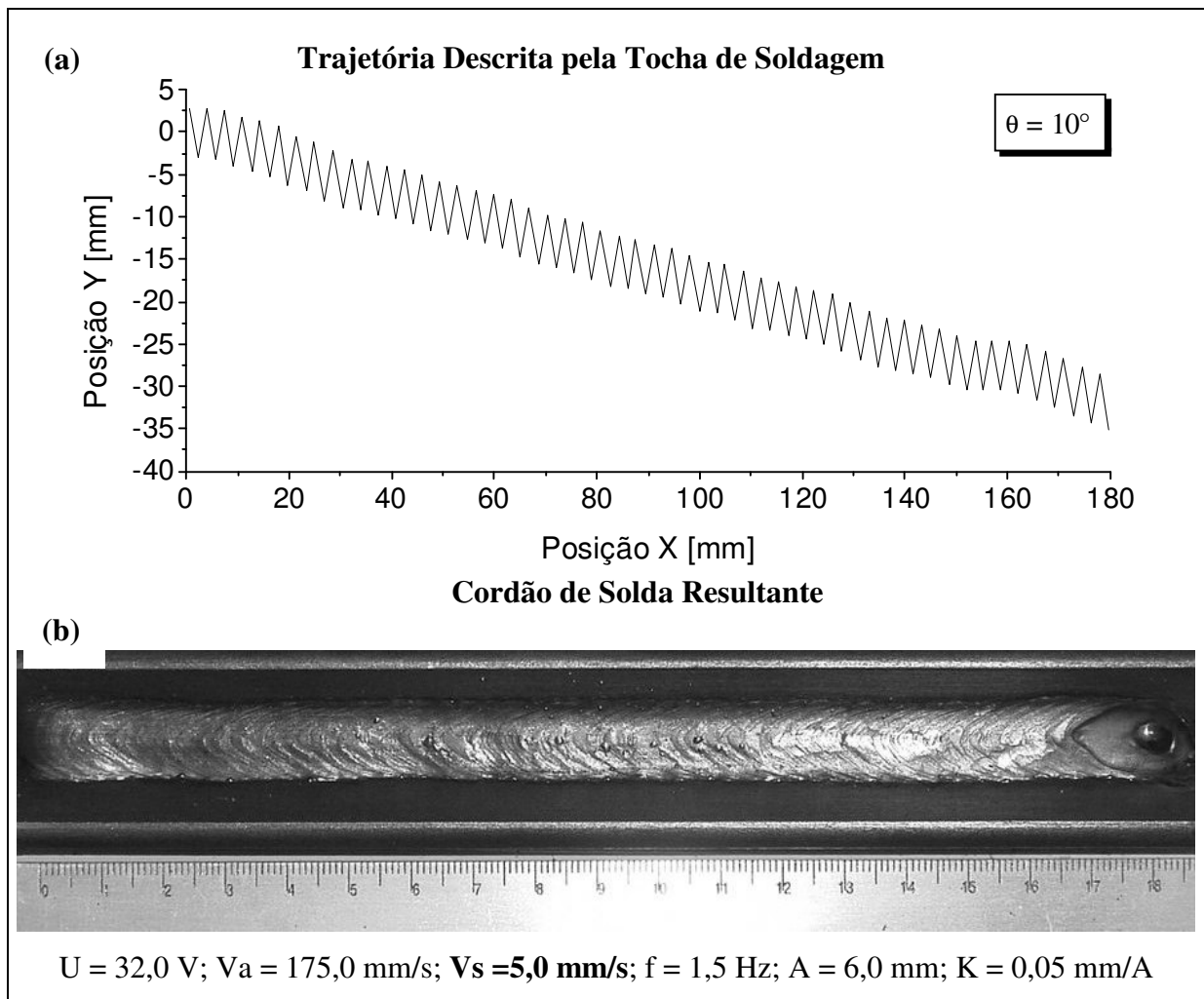


Figura 6.18 – Resultado do Ensaio V50G (transferência goticular axial).

Outro fator investigado foi a frequência de tecimento. As figuras 6.19 e 6.20 apresentam os resultados dos ensaios F10C e F10G. Nota-se que o cordão apresentou mordeduras para o primeiro ensaio. Já para o segundo ensaio, o sistema não foi capaz de seguir a junta devido à velocidade de soldagem ser muito alta para a frequência utilizada. Com o aumento da velocidade de soldagem e a diminuição da frequência de tecimento, o número de correções efetuadas pelo sistema, para um mesmo comprimento da junta, tende a diminuir. O que ocorreu no ensaio F10G foi que o número reduzido de correções não foi suficiente para manter a tocha alinhada.

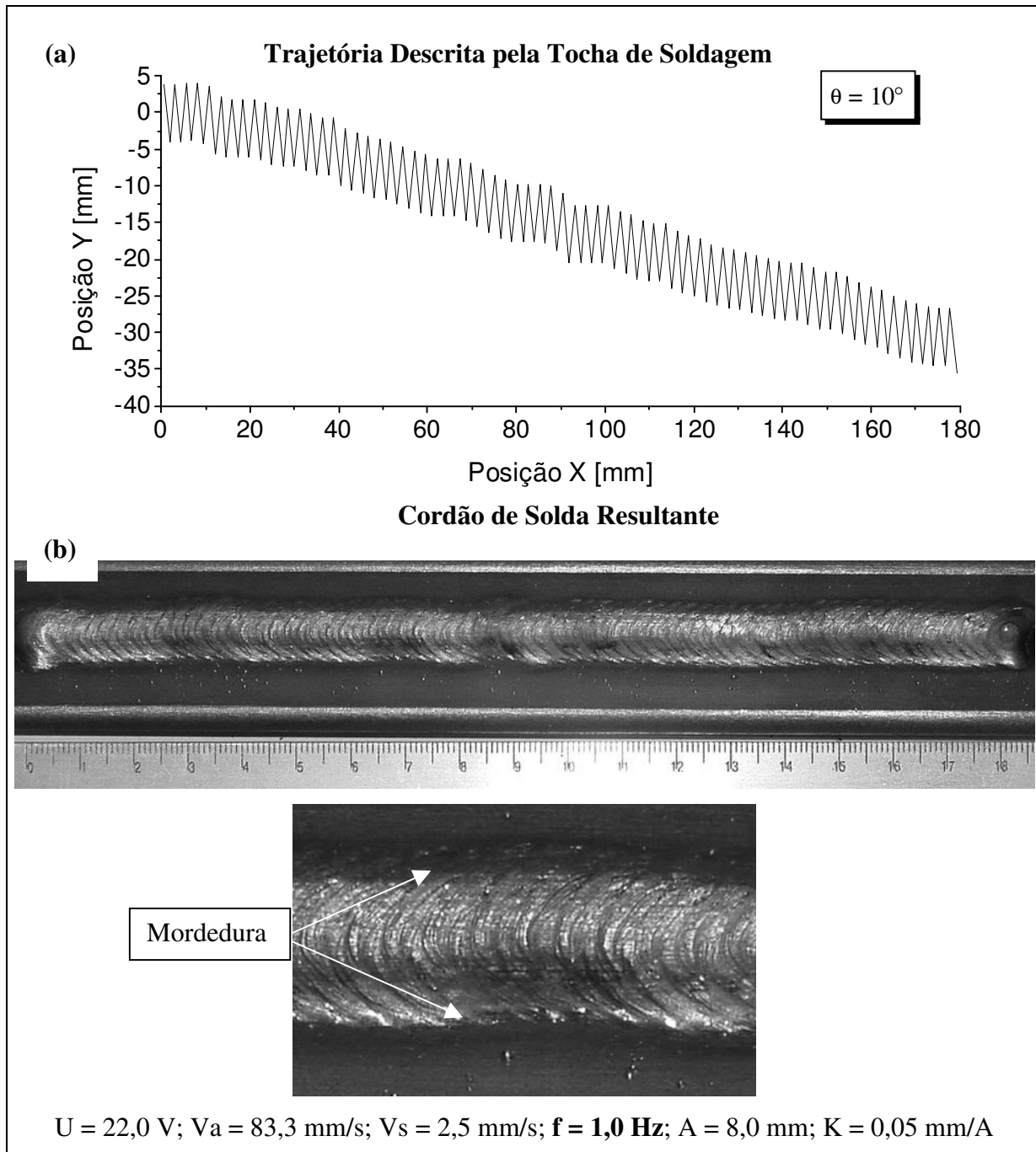


Figura 6.19 – Resultado do ensaio F10C (transferência por curto-circuito).

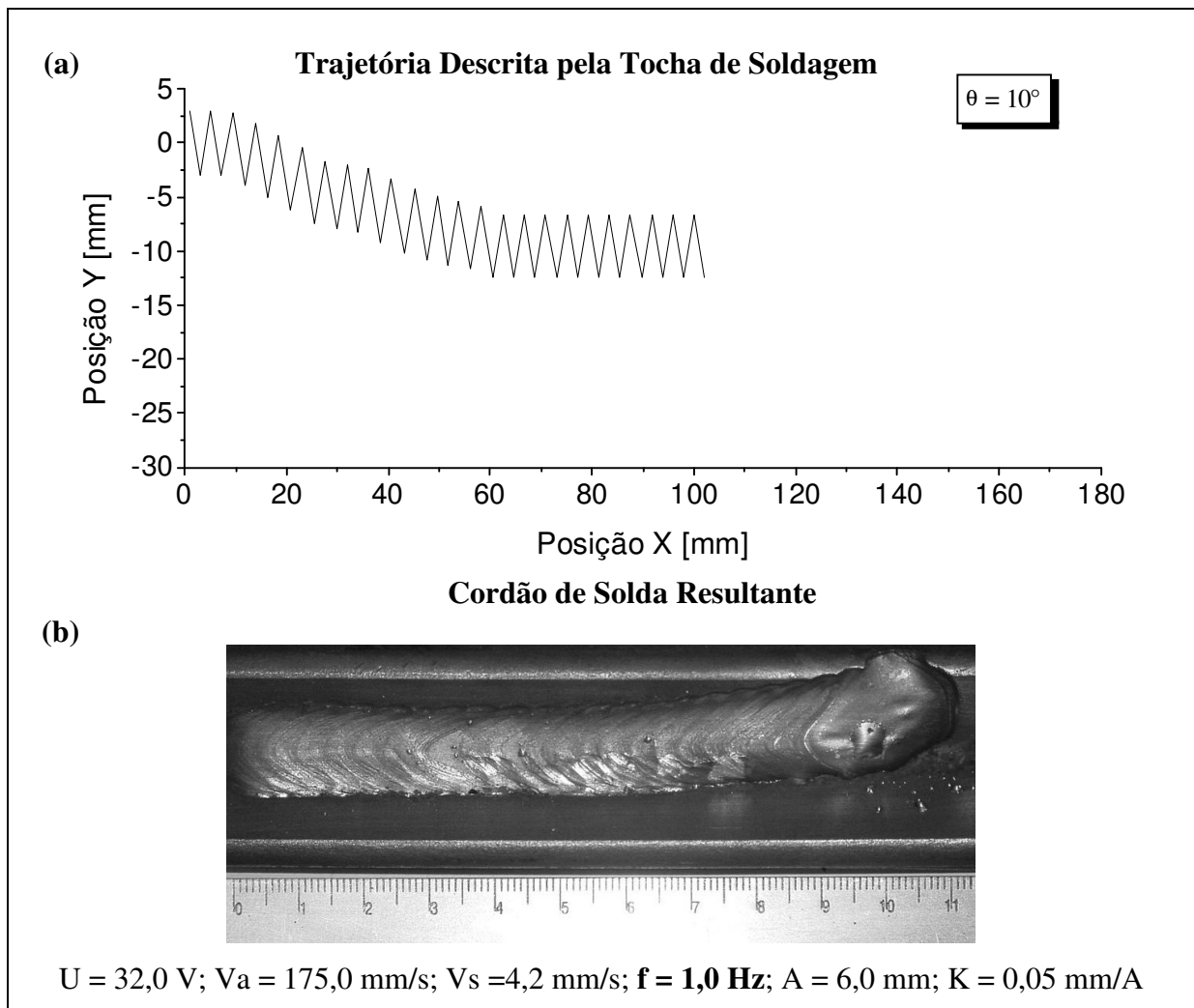


Figura 6.20 – Resultado do ensaio F10G (transferência goticular axial).

Para os ensaios F20C e F20G, figuras 6.21 e 6.22, apesar do sistema ter conseguido seguir a junta, observaram-se certas instabilidades na trajetória da tocha de soldagem devido à ocorrência de vibração excessiva do sistema de deslocamento. Isso demonstrou que as frequências utilizadas estavam próximas do limite da faixa de operação do equipamento. Portanto, pode-se estabelecer que não é aconselhável o emprego de frequências de tecimento iguais ou superiores ao valor de 2,0 Hz.

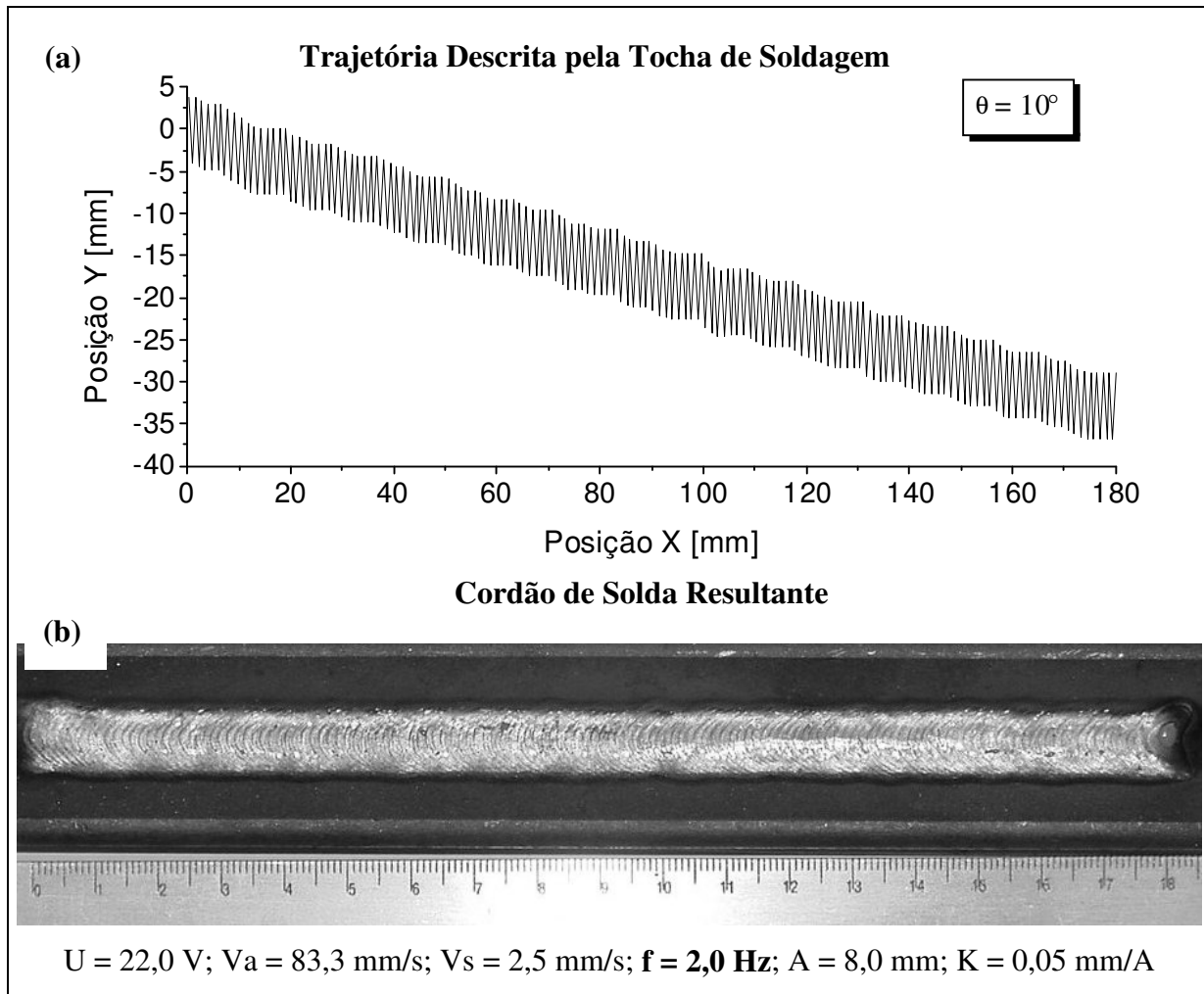


Figura 6.21 – Resultado do ensaio F20C (transferência por curto-circuito).

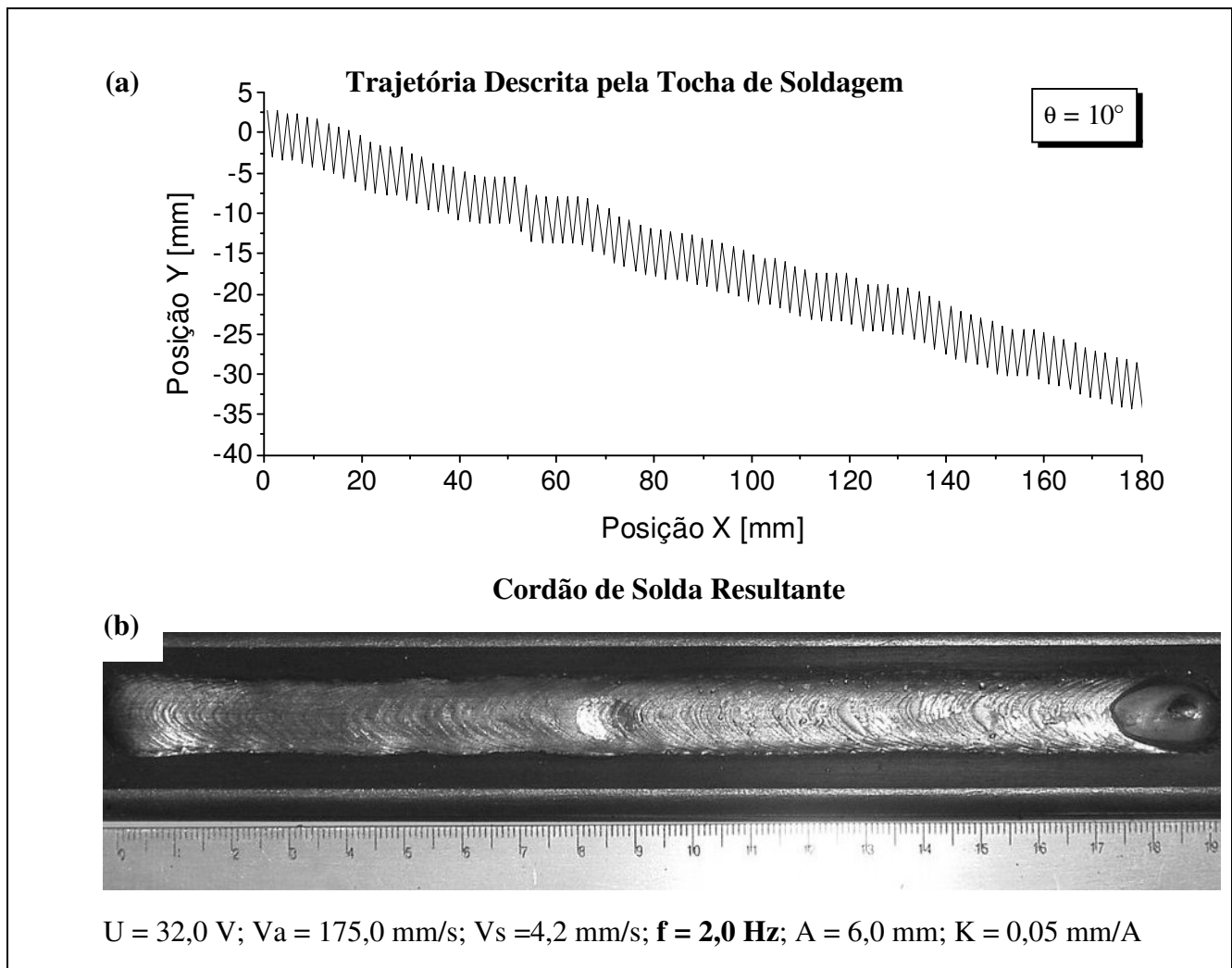


Figura 6.22 - Resultado do ensaio F20G (transferência gótica axial).

Com relação à variação da amplitude de tecimento, o ensaio A60C, figura 6.23, demonstrou que o sistema obteve sucesso no emprego desse valor de amplitude. É importante compreender que, quanto menor for a amplitude de tecimento, menor será a variação do comprimento do eletrodo nas extremidades da junta. Ou seja, a diferença entre os valores da corrente média se tornará menor, dificultando a percepção do erro de alinhamento da junta pelo sistema.

Portanto, o sistema não conseguiu manter o alinhamento da tocha no ensaio A40C, figura 6.24. Apesar do sistema ainda ter conseguido efetuar correções, o cordão de solda não ficou devidamente centralizado na junta, figura 6.24b. Além disso, pode-se perceber que ocorreram variações significativas na trajetória da tocha, principalmente no início do ensaio, figura 6.24a.

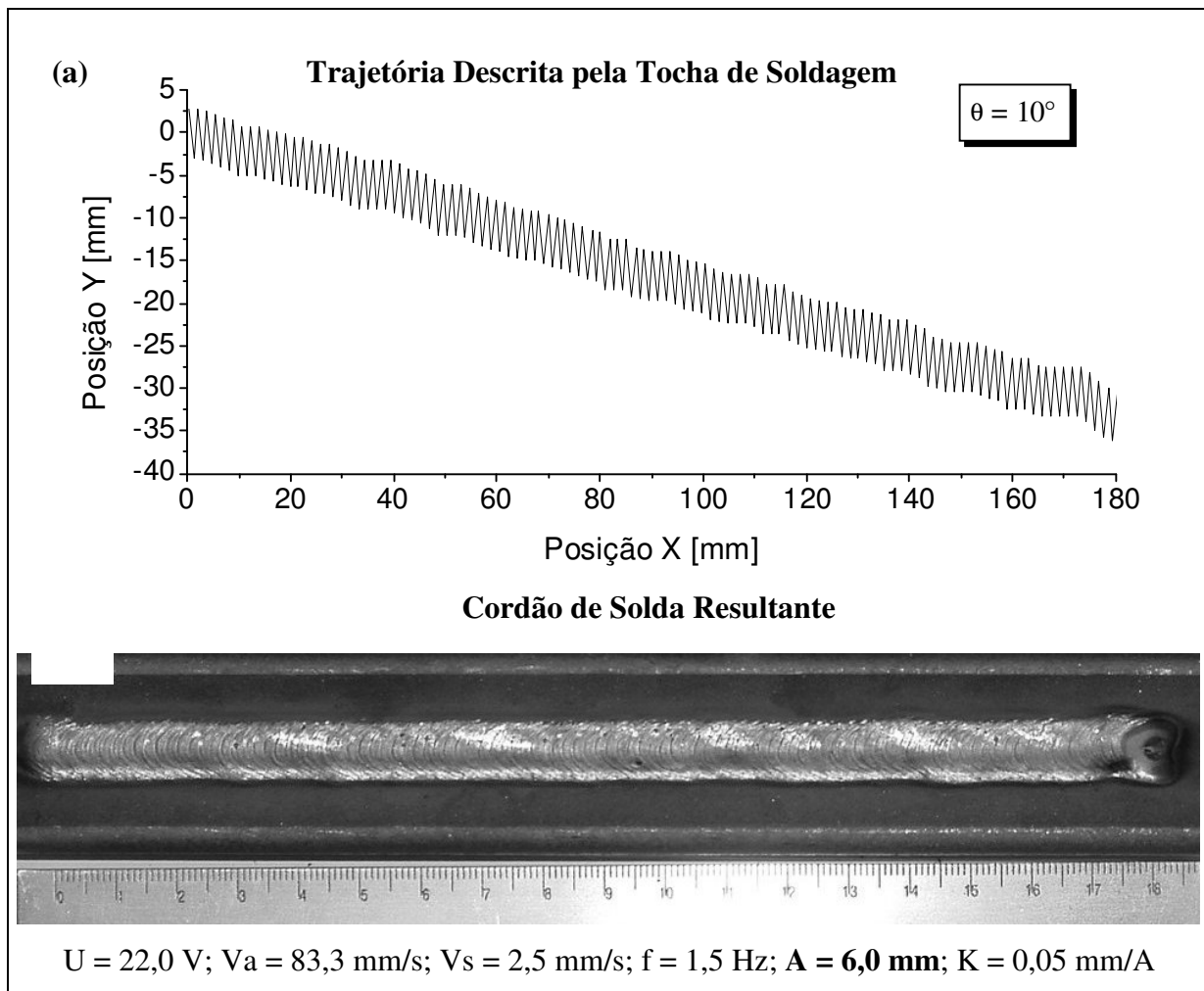


Figura 6.23 – Resultado do ensaio A60C (transferência por curto-circuito).

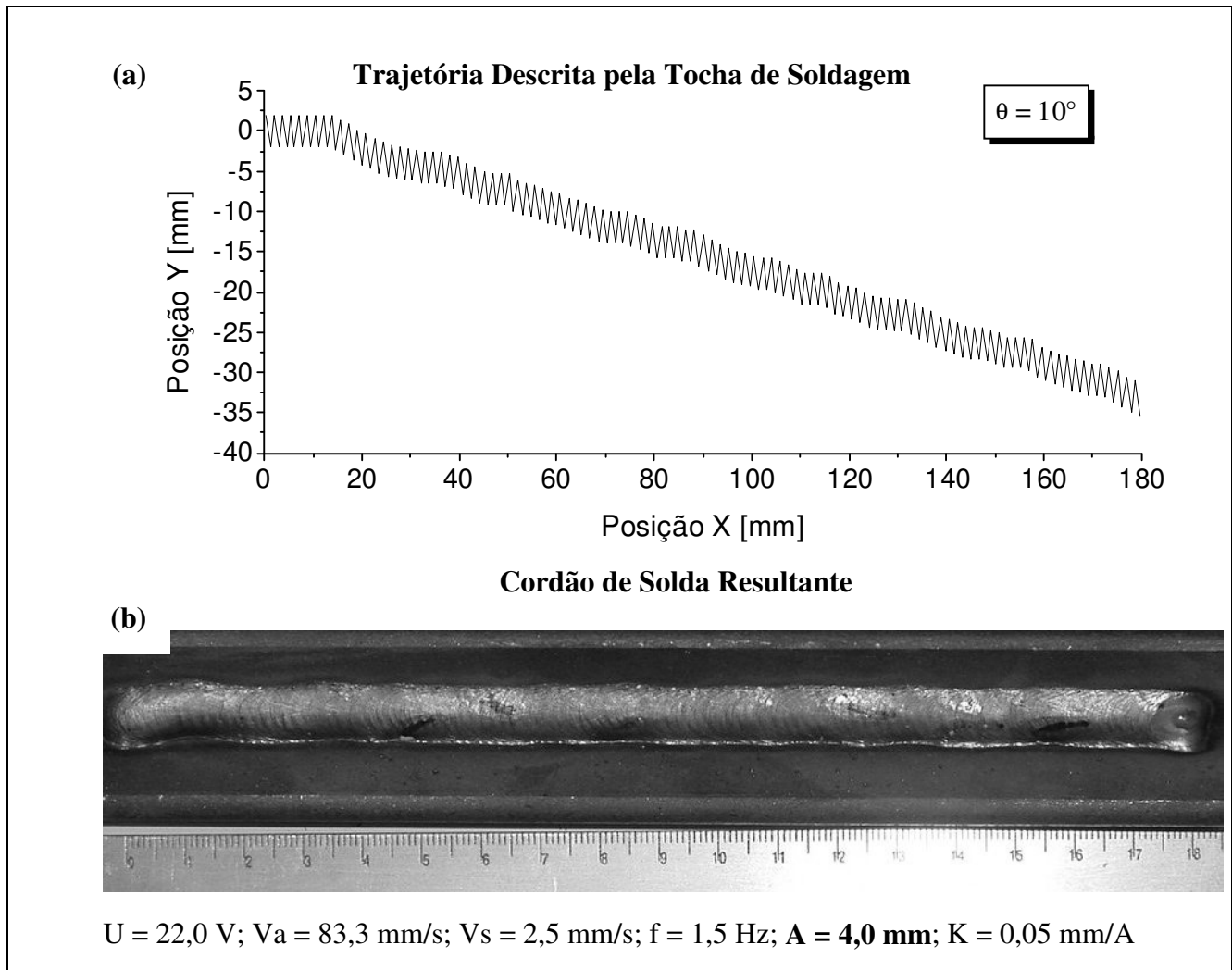


Figura 6.24- Resultado do ensaio A40C (transferência por curto-circuito).

Já para o ensaio A40G, figura 6.25, devido ao sinal da corrente ser mais uniforme no modo de transferência goticular axial (Costa, A.R. e Dutra, J.C., 2001), conseguiu-se ainda obter um resultado satisfatório para esse valor de amplitude. O que já não ocorreu no ensaio A20G, figura 6.26. Entretanto, o ensaio A20G apenas serviu para se verificar o limite de utilização do sistema, pois há pouco emprego prático para um valor de amplitude tão pequeno para o modo de transferência goticular axial.

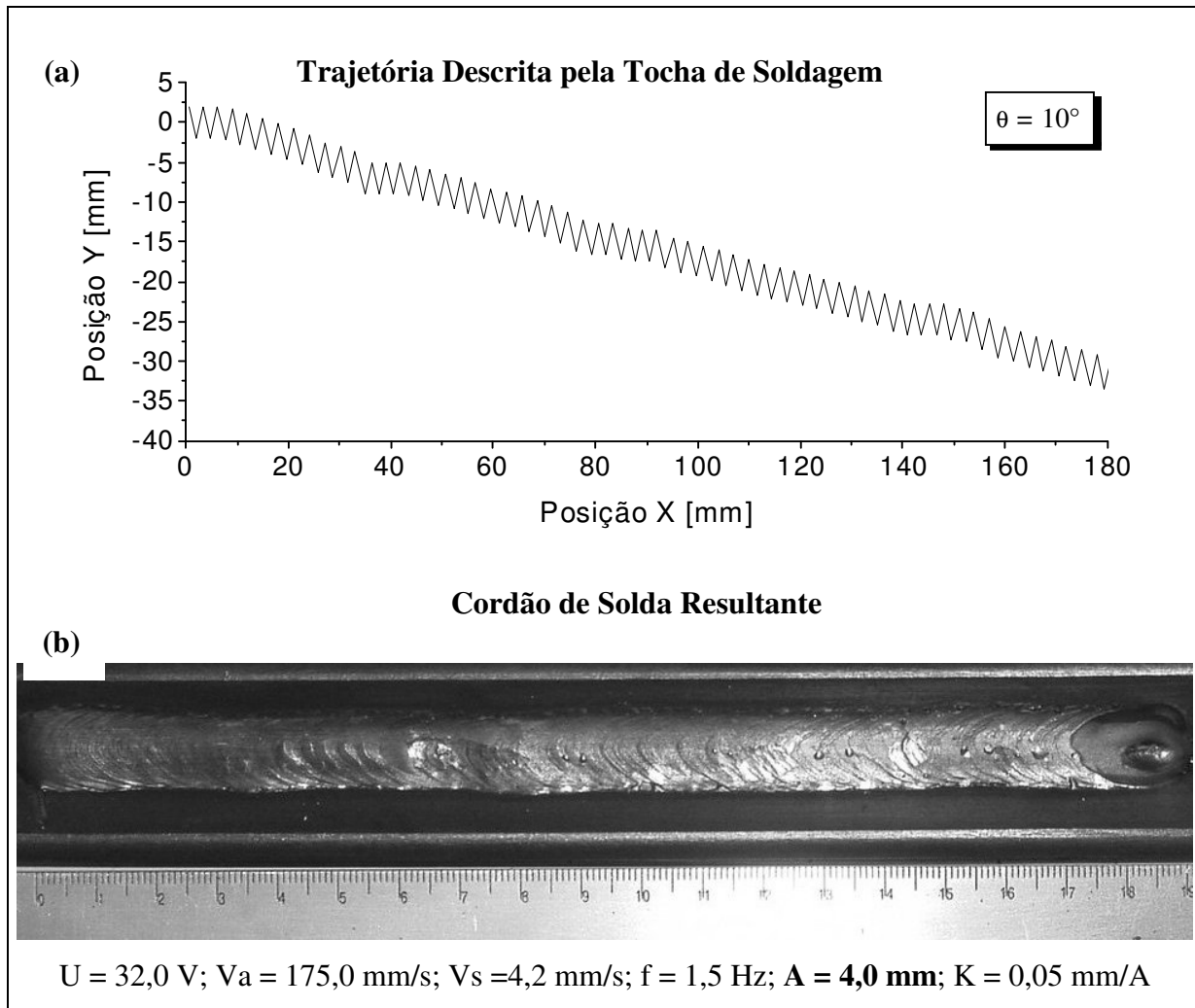


Figura 6.25 – Resultado do ensaio A40G (transferência goticular axial).

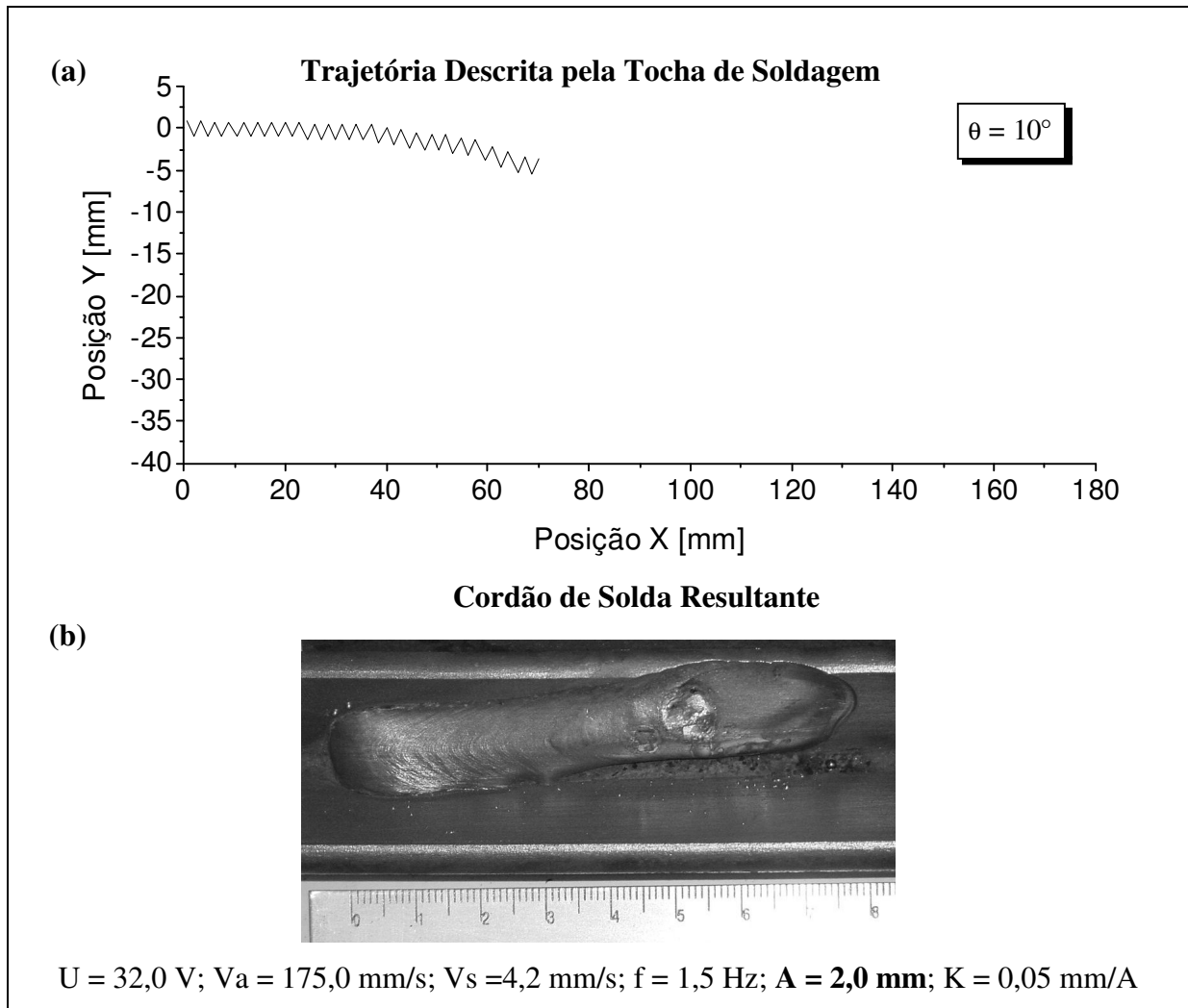


Figura 6.26 – Resultado do ensaio A20G (transferência goticular axial).

No entanto, devido à possível aplicação prática da configuração $A = 4,0$ mm para o modo de transferência por curto-circuito, mais alguns testes foram realizados na tentativa de se obter sucesso na utilização do sistema para esse valor de amplitude. Tentou-se então aumentar a sensibilidade do sistema através do incremento do fator ‘K’. Entretanto, como pode ser visto nas figuras apresentadas no anexo ‘B’, não se conseguiu obter nenhum resultado satisfatório. Mesmo quando o sistema conseguiu seguir a junta, os cordões de solda apresentaram variações na sua forma devido ao movimento irregular da tocha de soldagem. Além do defeito nos cordões, percebeu-se que o sistema se perdia mais facilmente na ocorrência de pequenas instabilidade no processo, resultando no não seguimento da junta.

Os ensaios subseqüentes tiveram como objetivo demonstrar a capacidade do sensor de arco desenvolvido em reconhecer diferentes ângulos de desvio da junta.

Os resultados dos ensaios D25C (figura 6.27), D25G (figura 6.28), D50C (figura 6.29), D50G (figura 6.30), D150C (figura 6.31) e D150G (figura 6.32) demonstram que o sistema conseguiu seguir eficientemente a linha central de soldagem em todas as situações empregadas.

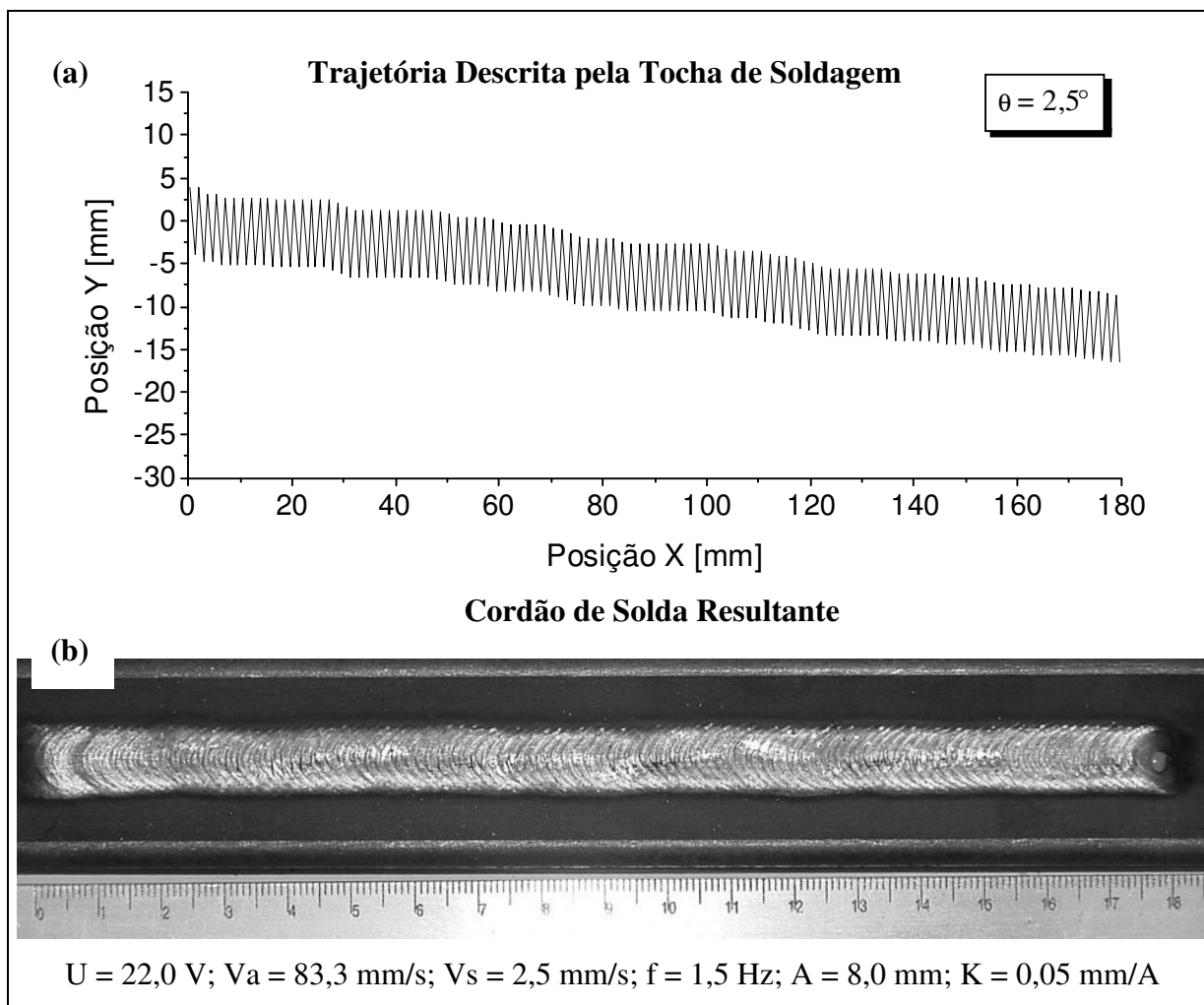


Figura 6.27 – Resultado do ensaio D25C (transferência por curto-circuito).

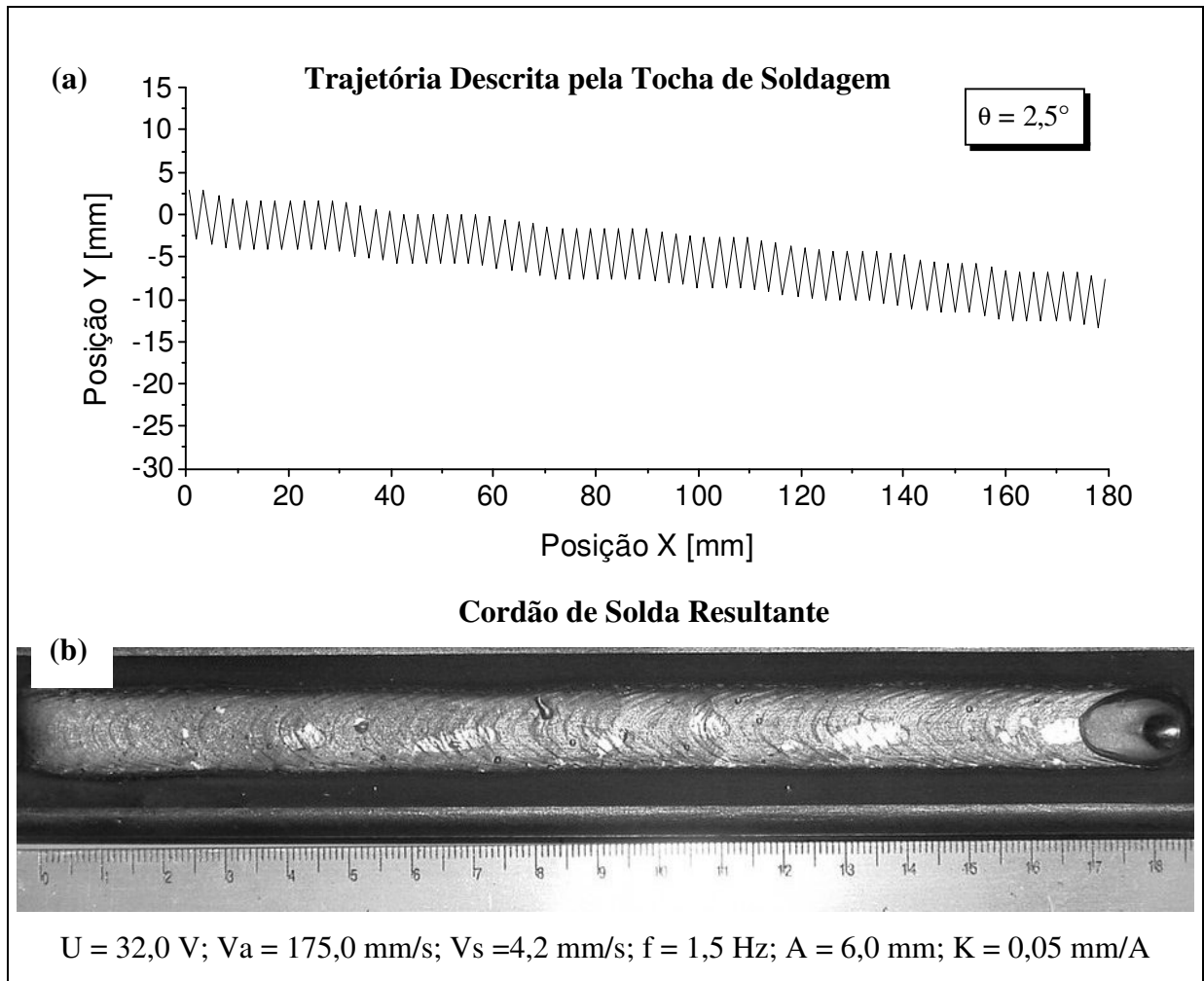


Figura 6.28 - Resultado do ensaio D25G (transferência goticular axial).

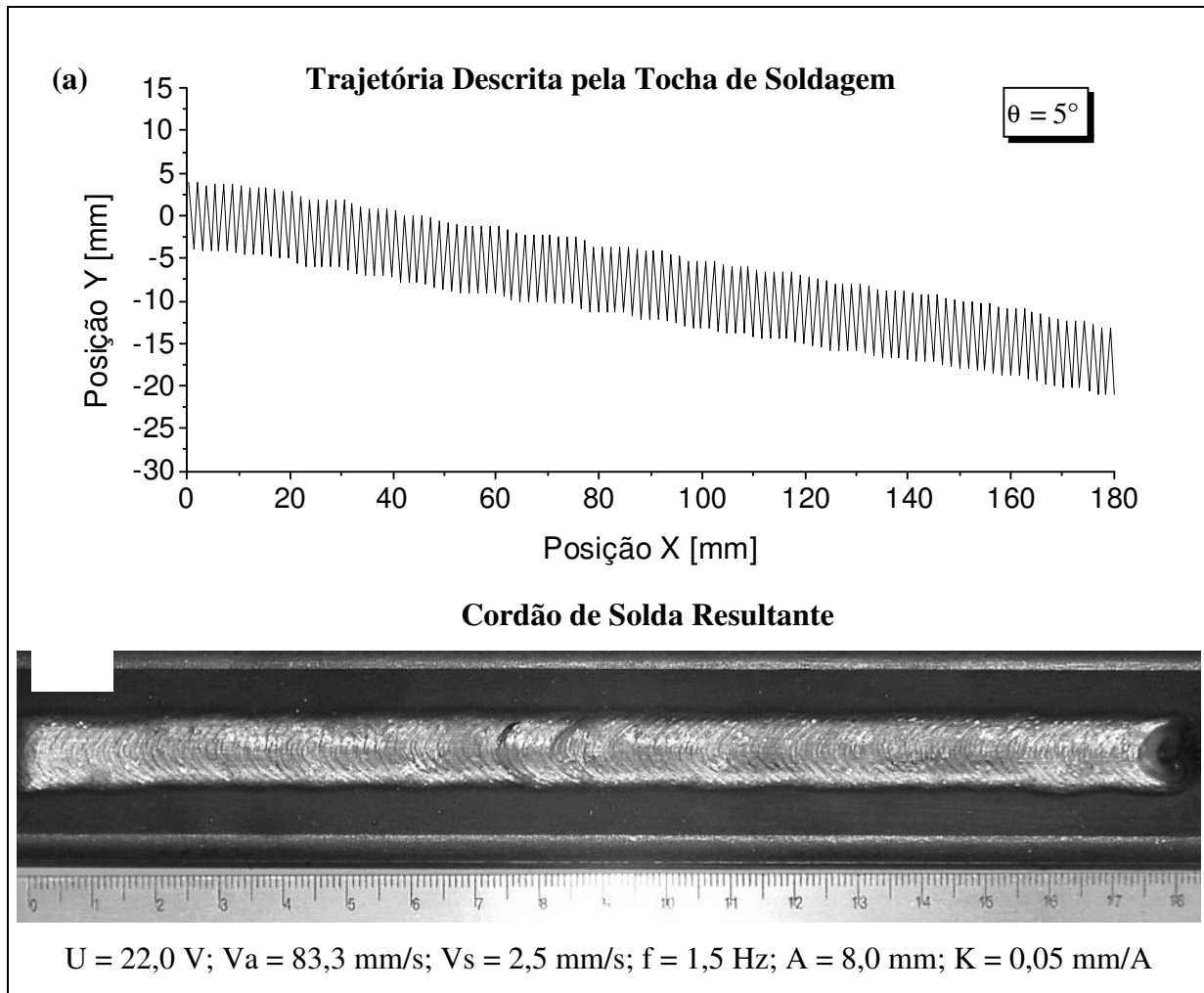


Figura 6.29 – Resultado do ensaio D50C (transferência por curto-circuito).

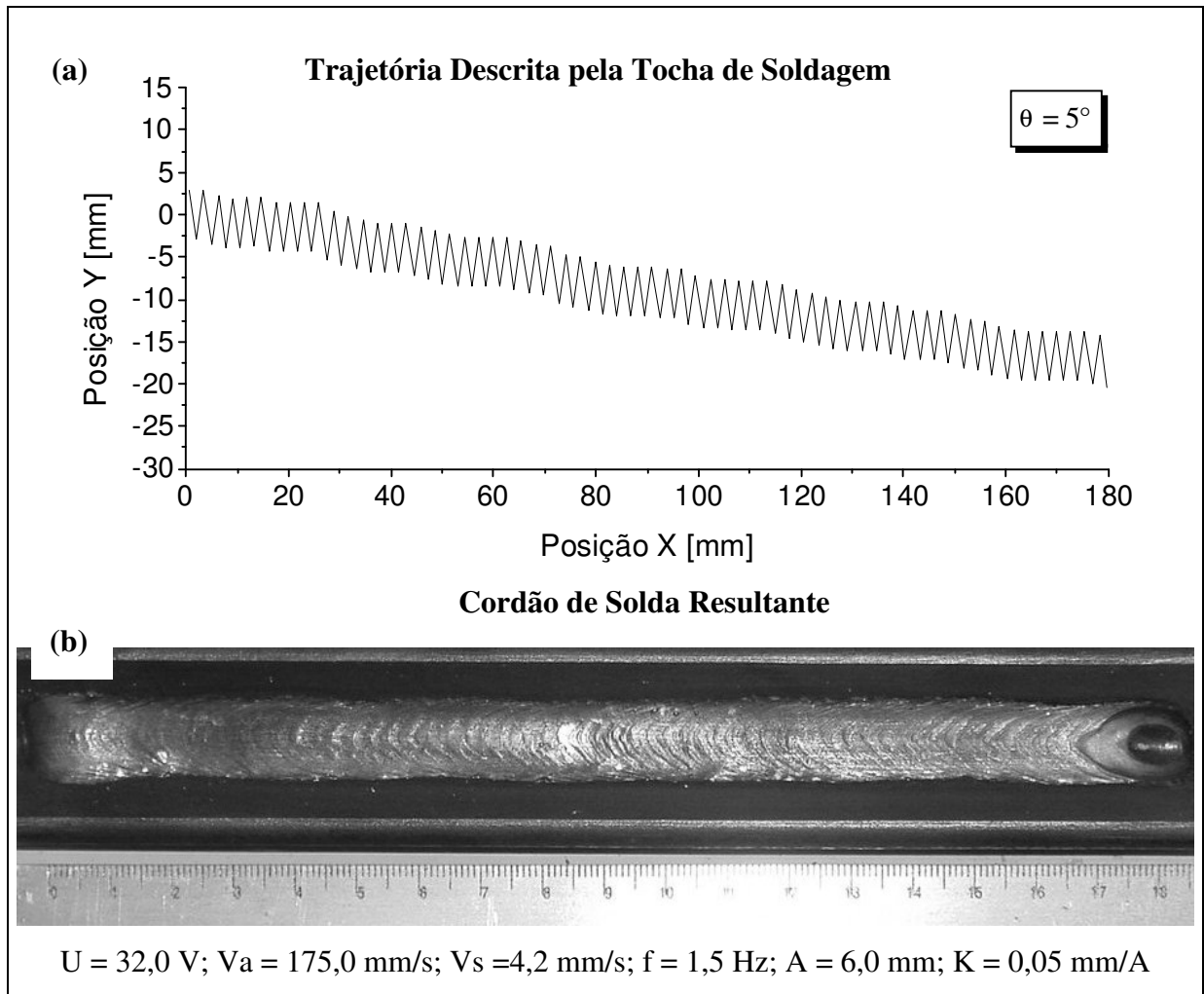


Figura 6.30 - Resultado do ensaio D50G (transferência goticular axial).

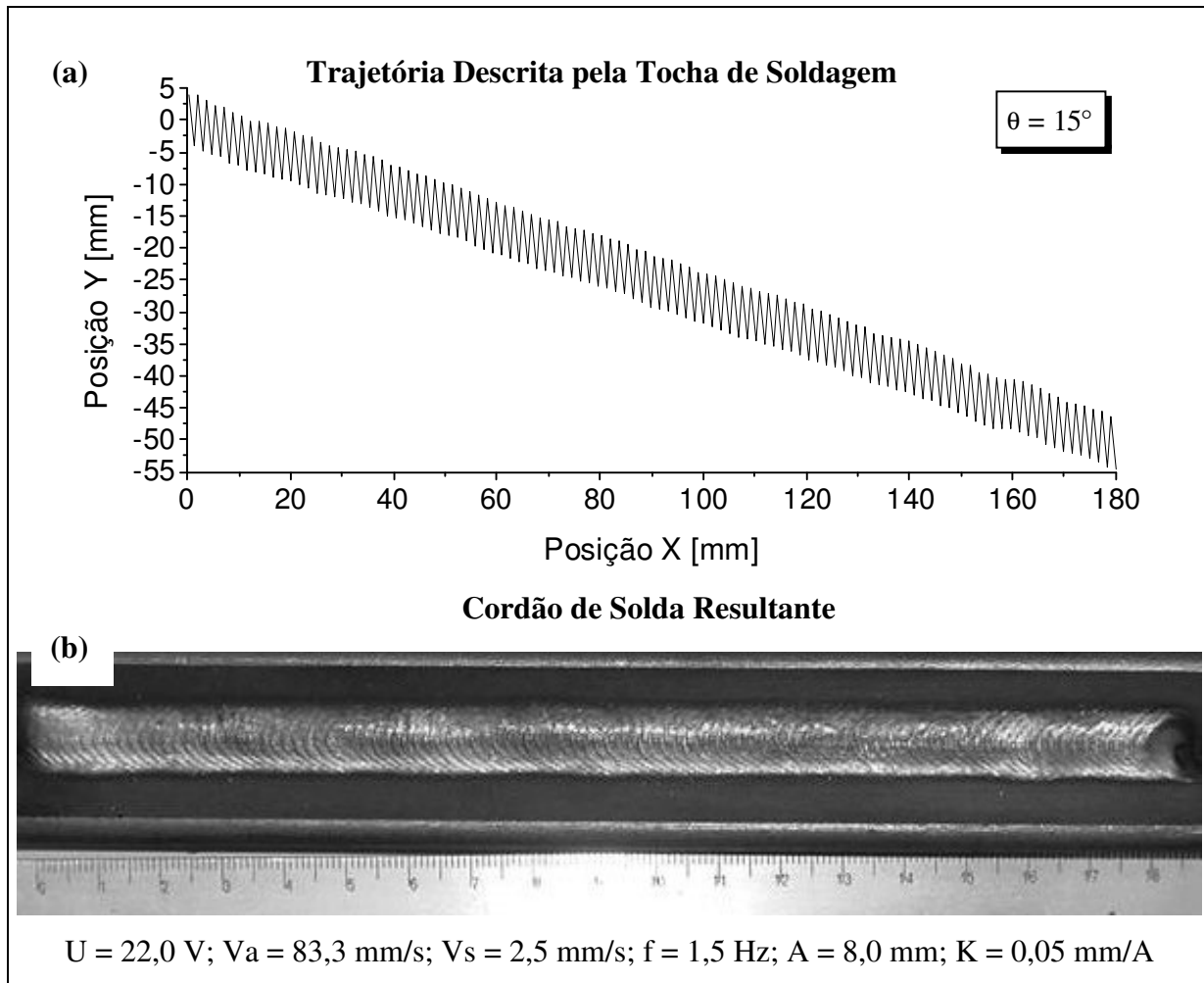


Figura 6.31 - Resultado do ensaio D150C (transferência por curto-circuito).

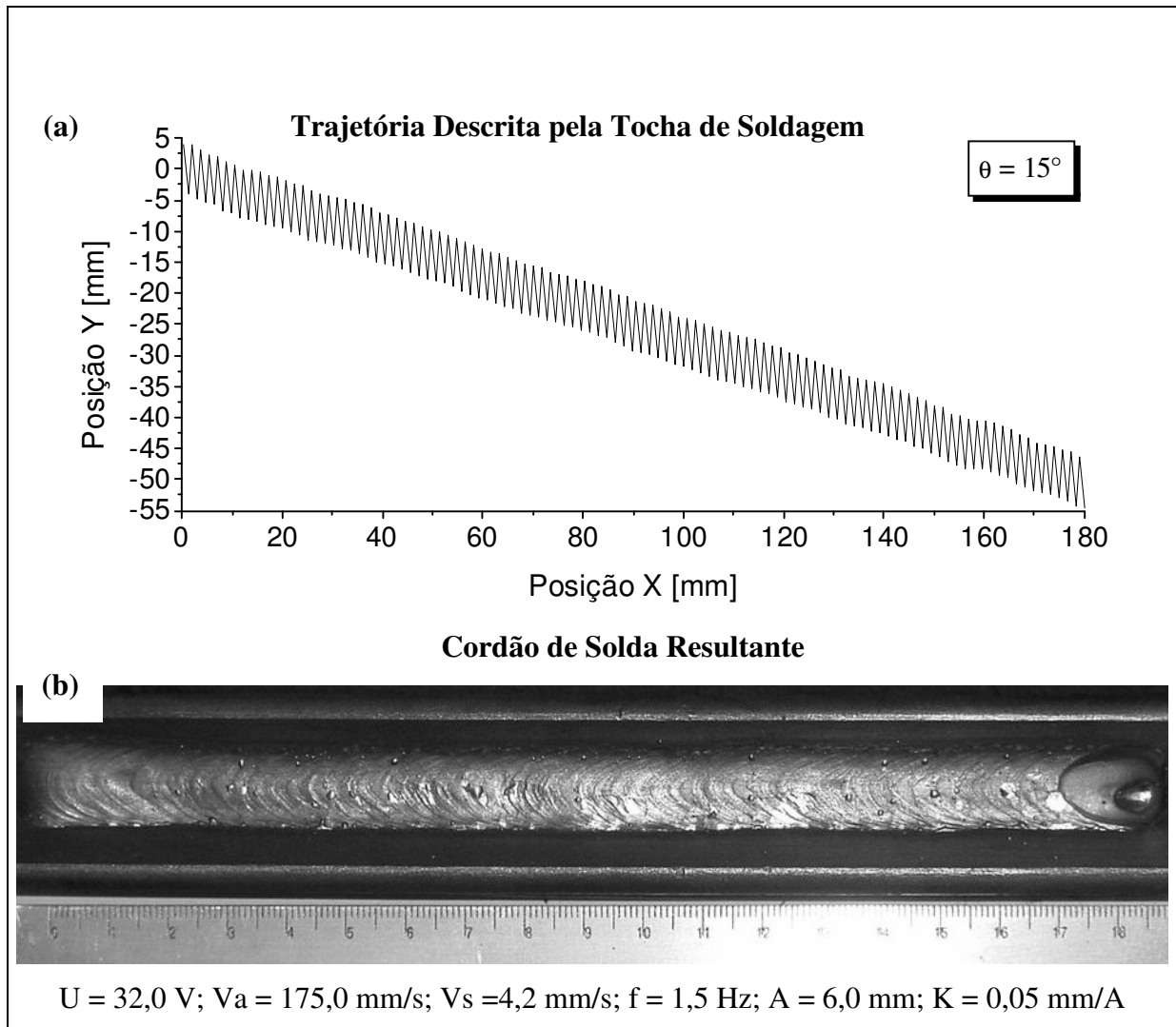


Figura 6.32 - Resultado do ensaio D150G (transferência gótica axial).

Os dois últimos ensaios, D00C e D00G, objetivaram comprovar a capacidade do sensor de arco em reconhecer se a junta já se encontra inicialmente alinhada com a trajetória de soldagem, ou seja, que o sistema não efetuará correções caso não houvesse necessidade.

Como se pode perceber nas figuras 6.33 e 6.34, o sistema apenas efetuou uma pequena correção inicial na trajetória da tocha, devido a pequenos erros de posicionamento inicial, e seguiu reto o restante da junta.

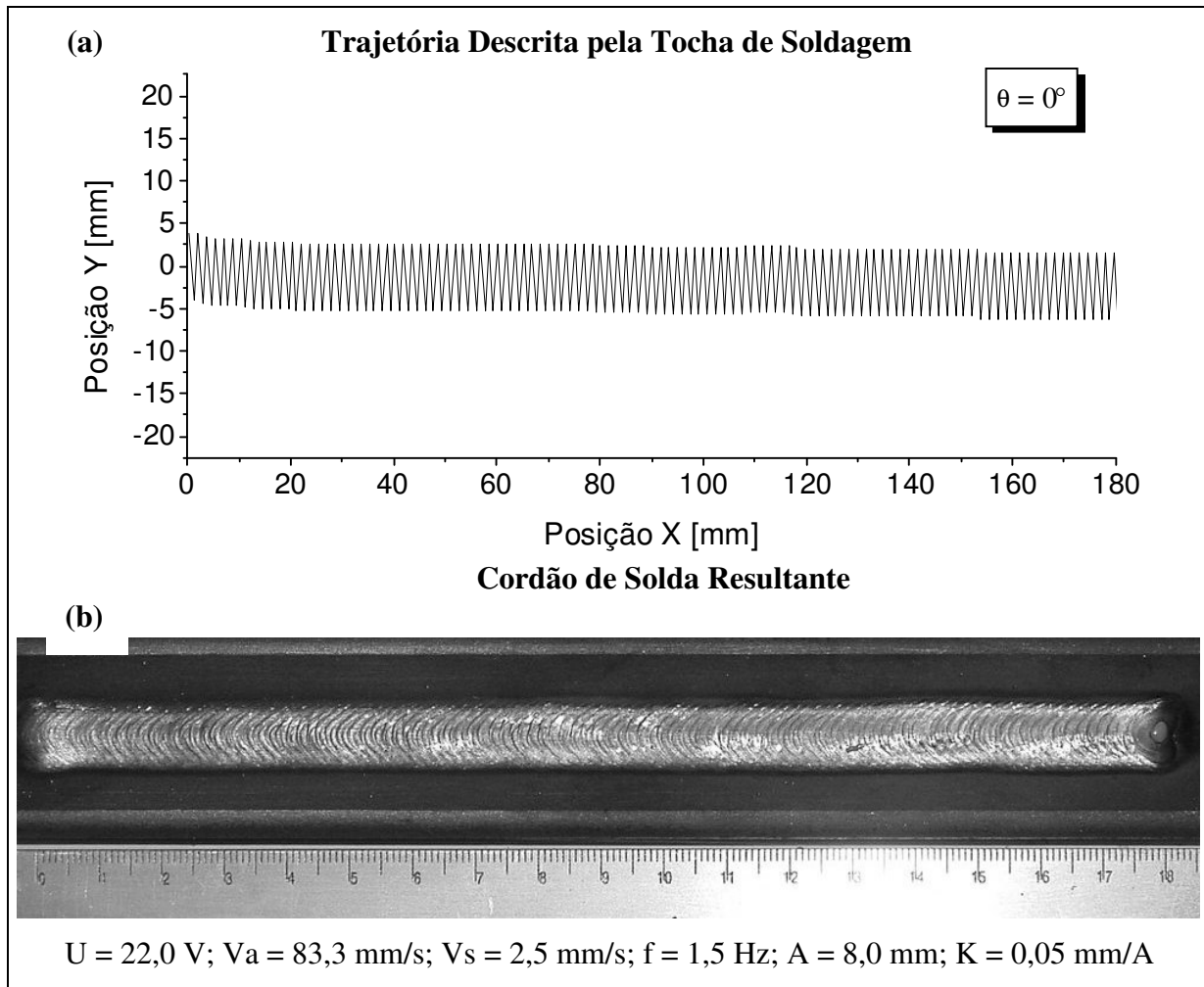


Figura 6.33 - Resultado do ensaio D00C (transferência por curto-circuito).

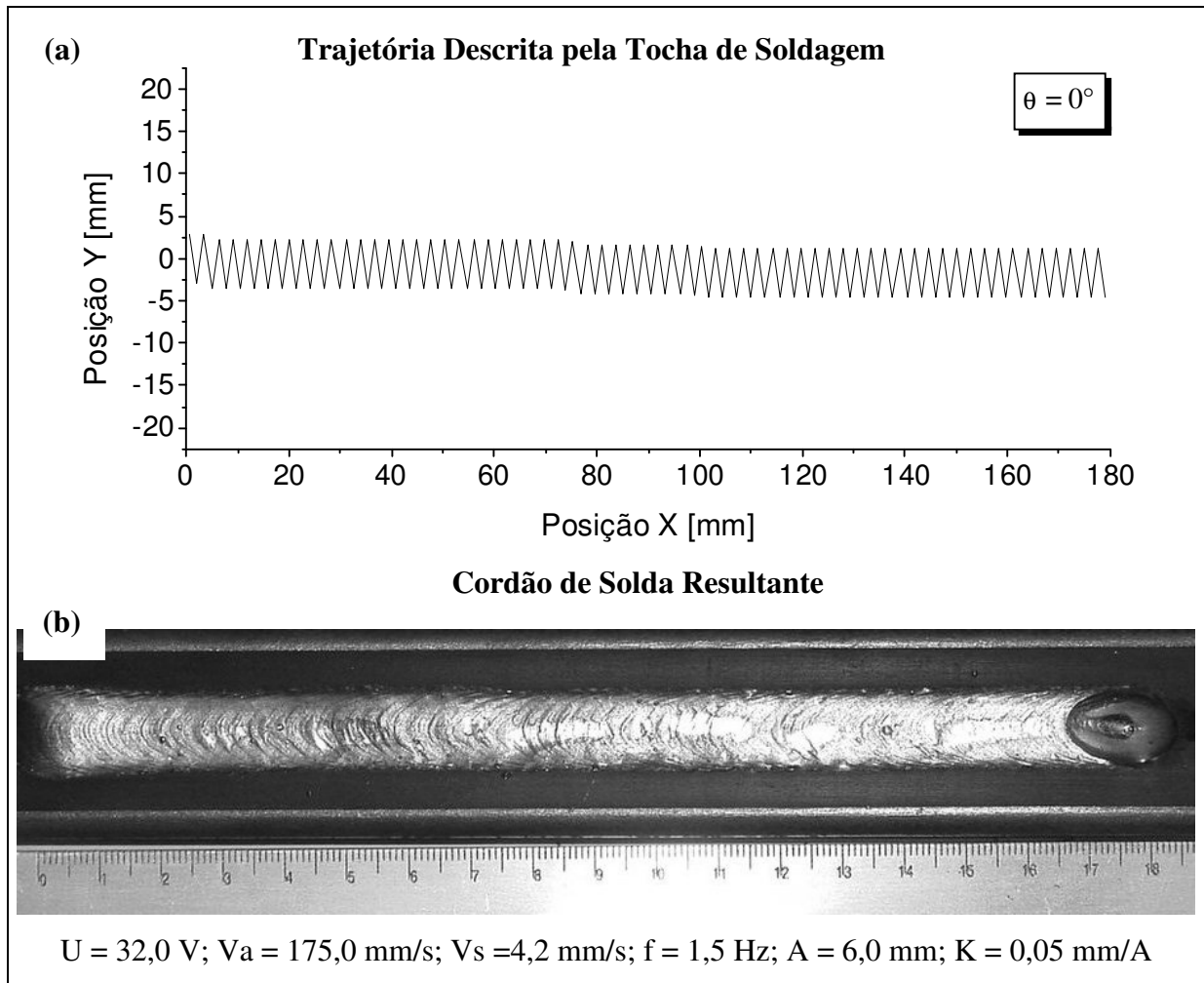


Figura 6.34 - Resultado do ensaio D00G (transferência goticular axial).

As tabelas a seguir resumem os resultados dos ensaios.

Tabela 6.1 – Resultados finais obtidos nos ensaios realizados no modo de transferência por curto-circuito.

| Ensaio | V_s (mm/s) | f (Hz) | A (mm) | θ (graus) | Resultado |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| V33C | 3,3 | 1,5 | 8 | 10,0 | Velocidade Alta. Mordeduras. |
| V25C F15C A80C D100C | 2,5 | 1,5 | 8 | 10,0 | Sucesso |
| V17C | 1,7 | 1,5 | 8 | 10,0 | Velocidade Baixa. Instabilidade no Cordão. |
| F10C | 2,5 | 1,0 | 8 | 10,0 | Frequência Baixa. Mordeduras. |
| F20C | 2,5 | 2,0 | 8 | 10,0 | Sucesso. Limite do Sistema. |
| A60C | 2,5 | 1,5 | 6 | 10,0 | Sucesso |
| A40C | 2,5 | 1,5 | 4 | 10,0 | Não Seguiu |
| D00C | 2,5 | 1,5 | 8 | 0 | Sucesso |
| D25C | 2,5 | 1,5 | 8 | 2,5 | Sucesso |
| D50C | 2,5 | 1,5 | 8 | 5,0 | Sucesso |
| D150C | 2,5 | 1,5 | 8 | 15,0 | Sucesso |

Tabela 6.2 – Resultados finais obtidos nos ensaios realizados no modo de transferência goticular axial.

| Ensaio | V_s (mm/s) | f (Hz) | A (mm) | θ (graus) | Resultado |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| V50G | 5,0 | 1,5 | 6,0 | 10,0 | Velocidade Alta Mordedura |
| V42G F15G A60G D100G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 10,0 | Sucesso |
| V33G | 3,3 | 1,5 | 6,0 | 10,0 | Velocidade Baixa Instabilidade no Cordão |
| F10G | 4,2 | 1,0 | 6,0 | 10,0 | Não Seguiu |
| F20G | 4,2 | 2,0 | 6,0 | 10,0 | Sucesso Limite do Sistema |
| A40G | 4,2 | 1,5 | 4,0 | 10,0 | Sucesso |
| A20G | 4,2 | 1,5 | 2,0 | 10,0 | Não Seguiu |
| D00G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 0 | Sucesso |
| D25G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 2,5 | Sucesso |
| D50G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 5,0 | Sucesso |
| D150G | 4,2 | 1,5 | 6,0 | 15,0 | Sucesso |

6.3 Comparação entre o Sistema de Seguimento de Junta Desenvolvido e um Sistema Comercial.

A tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados na ‘Bancada de Avaliação’ para o modo de transferência por curto circuito. A coluna designada por ‘Correção’ apresenta os valores corrigidos pelo robô. Nesses ensaios, como a junta estava desviada para a esquerda, o sentido correto do ajuste seria para a direita. As fotos dos cordões de solda encontram-se no anexo ‘C’.

Tabela 6.3 – Resultados dos ensaios realizados na “Bancada de Avaliação” para o modo de transferência por curto circuito.

| Ensaio | Vs (mm/s) | f (Hz) | θ (graus) | Correção (mm) | | Resultado |
|--------|--------------|-----------|---------------------|---------------|---------|----------------------------|
| | | | | Esquerda | Direita | |
| COMP1 | 2,5 | 3 | 2,5 | 1,8 | 9,3 | Sucesso |
| COMP2 | 2,5 | 3 | 5 | 0,3 | 15,9 | Sucesso |
| COMP3 | 2,5 | 3 | 10 | 0,3 | 32,1 | Sucesso |
| COMP4 | 2,5 | 3 | 15 | 0,0 | 39,3 | Não corrigiu o suficiente. |
| COMP5 | 1,7 | 3 | 15 | 0,0 | 51,2 | Sucesso |

Nota-se que existe uma tendência do sistema em funcionar mais satisfatoriamente, no que concerne às correções efetuadas, à medida que se aumenta o ângulo de desvio (até um certo limite). Apesar de não se conhecer como o robô efetua o cálculo dessas correções, pode-se tentar explicar esse fato através do próprio princípio de funcionamento do sistema. Quanto maior for o ângulo de desvio, maior será a diferença entre as correntes de soldagem nas extremidades da junta, figura 6.35. Assim, o sistema é capaz de perceber mais facilmente para qual lado deve corrigir.

Para que o sistema de seguimento do robô funcionasse satisfatoriamente, para as mesmas configurações empregadas nos ensaios com o sistema proposto, foi necessário aumentar a frequência de tecimento para 3 Hz.

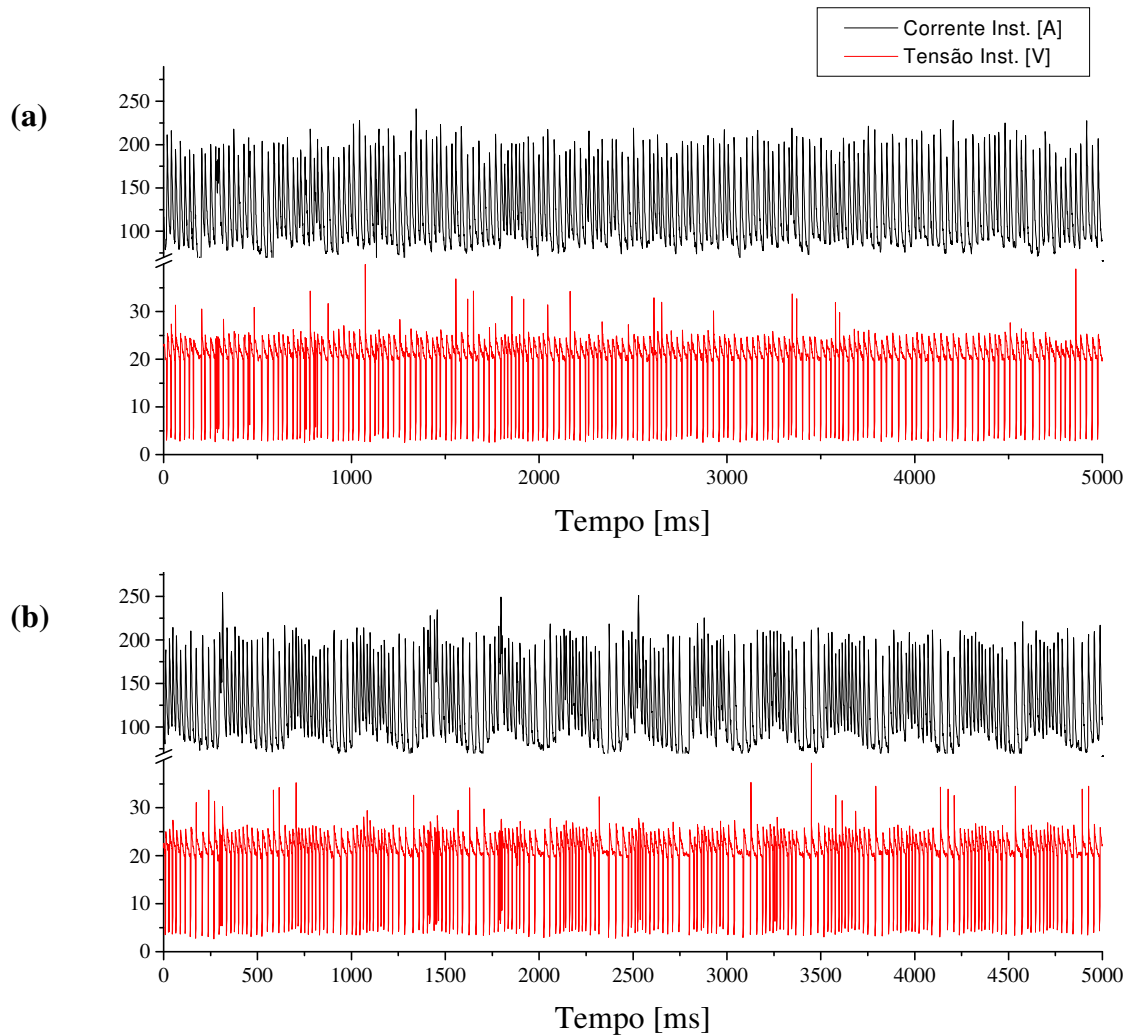


Figura 6.35 - Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem para os desvios de 2,5° (a) e 15° (b).

Percebe-se também que, para que o sistema obtivesse sucesso nos ensaios com desvio de 15°, foi necessário diminuir a velocidade de soldagem de 2,5 mm/s (15 cm/min) para 1,7 mm/s (10 cm/min).

A segunda bateria de testes foi realizada no modo de transferência goticular axial. A tabela 6.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 6.4 - Resultados dos ensaios realizados na “Bancada de Avaliação” para o modo de transferência goticular axial.

| Ensaio | Vs (mm/s) | f (Hz) | θ (graus) | Correção (mm) | | Resultado |
|--------|--------------|-----------|---------------------|---------------|---------|--------------------------------------------|
| | | | | Esquerda | Direita | |
| COMP6 | 6,7 | 2,0 | 2,5 | 0,0 | 7,6 | Sucesso |
| COMP7 | 6,7 | 2,0 | 5 | 0,0 | 14,4 | Sucesso |
| COMP8 | 6,7 | 2,0 | 10 | | | Não seguiu |
| COMP9 | 5,0 | 2,0 | 10 | 0,0 | 18,7 | Não corrigiu o suficiente. |
| COMP10 | 3,3 | 2,0 | 10 | 0,0 | 29,5 | Seguiu. Demasiado depósito de material. |
| COMP11 | 3,3 | 2,0 | 15 | -- | -- | Não seguiu |

Primeiramente, vê-se que as correções ocorreram de forma mais estável (valores de correção esquerda igual a zero) do que nos ensaios com transferência por curto-circuito. Esses melhores resultados ocorreram devido a corrente de soldagem variar de forma bem mais suave na transferência goticular axial, fato também observado no sistema desenvolvido. A figura 6.36 apresenta os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem referentes ao ensaio COMP6.

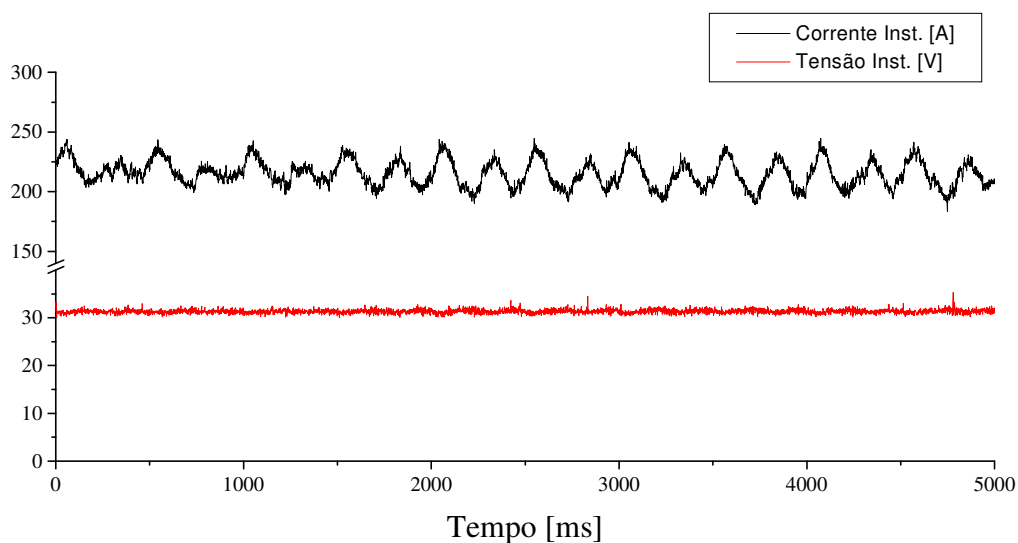


Figura 6.36 – Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem referentes ao ensaio COMP6.

A tabela 6.4 demonstra que, apesar do sistema ter conseguido seguir a junta no ensaio COMP10 ($\theta = 10^\circ$), este apresentou, devido à baixa velocidade de soldagem empregada, um cordão de solda visivelmente com excesso de material depositado. Sendo assim, o desvio máximo que o sistema conseguiu corrigir de forma satisfatória foi de 5° , ensaio COMP7.

É interessante observar que esses resultados contradizem o que vem no manual do robô, pois neste se diz claramente que o sistema não funciona no modo de transferência goticular axial.

6.4 Aplicação do Sistema de Seguimento de Junta na Soldagem de Juntas Chanfradas

As figuras 6.37 e 6.38 apresentam os resultados para as soldas de topo realizadas em juntas chanfradas em V, ensaios II e III. Como se pode observar, apesar do desvio inicial aplicado, o sistema conseguiu se manter alinhado com a linha central de soldagem. Esses resultados comprovam a aplicabilidade prática do sistema de seguimento de junta desenvolvido.

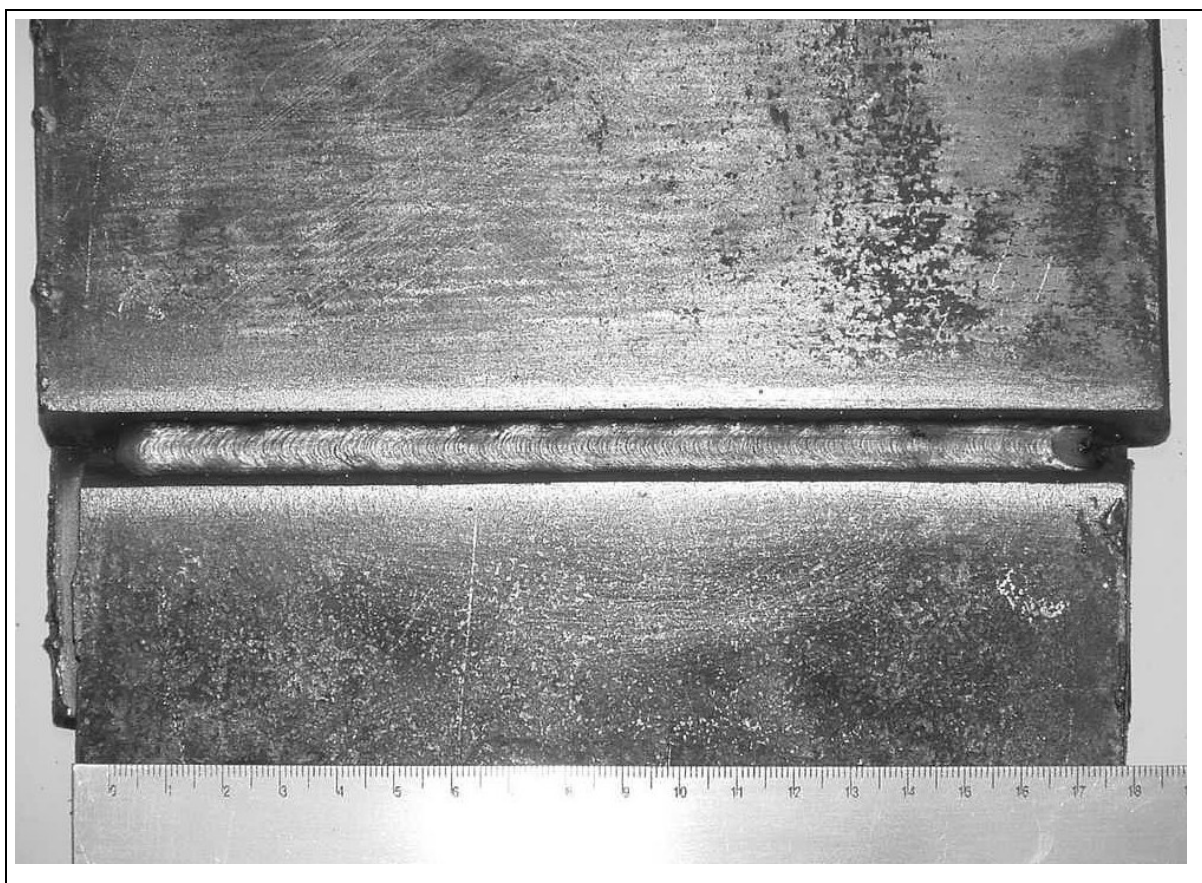


Figura 6.37 – Solda de topo realizada numa junta chanfrada em V propositalmente posicionada com desvio de 5° (ensaio II).

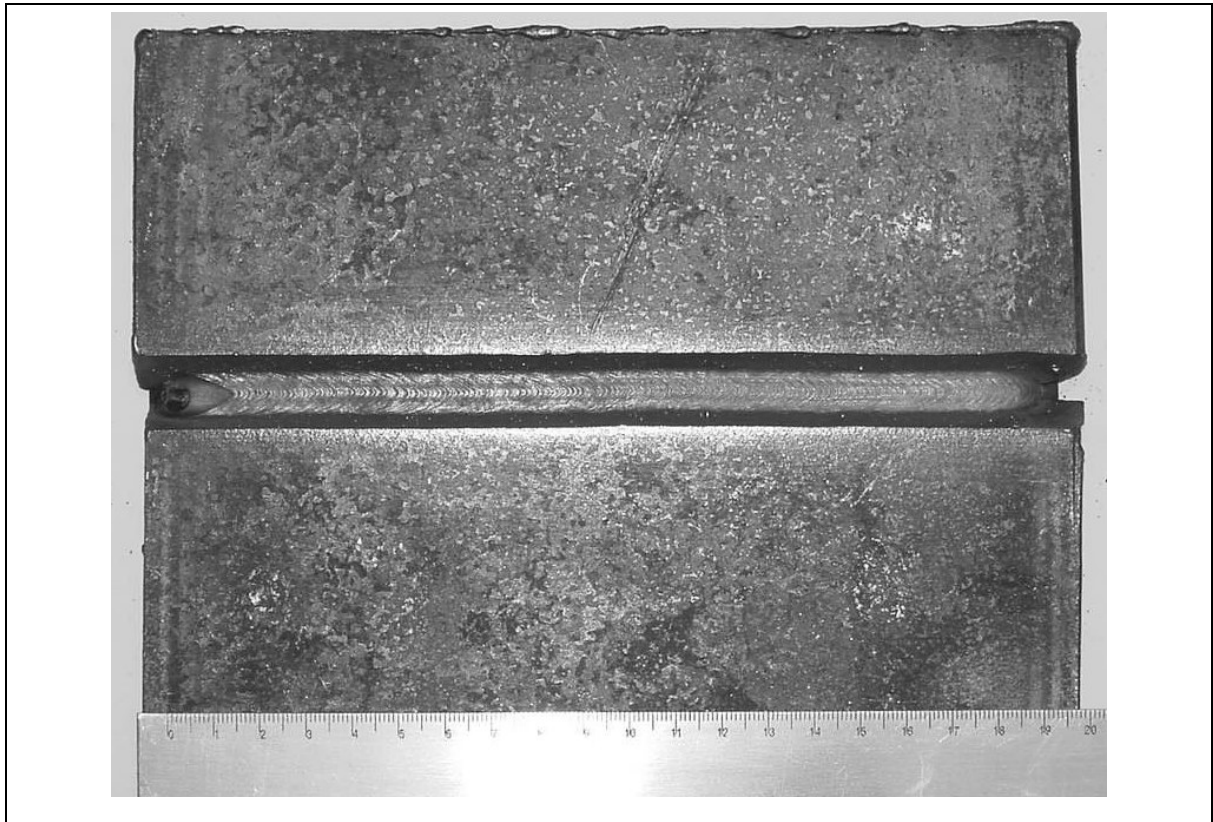


Figura 6.38 – Solda de topo realizada numa junta chanfrada em V propositalmente posicionada com desvio de 5° (ensaio JII).

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

O sistema de seguimento de junta desenvolvido apresentou excelentes resultados, cumprindo satisfatoriamente a performance pretendida para essa dissertação.

Quando empregado um conjunto de parâmetros de soldagem otimizados, o sistema foi capaz de reconhecer e corrigir ângulos de desvios da junta de até 15°, tanto no modo de transferência por curto-circuito, como no modo de transferência axial.

Verificou-se também que, apesar da relativa simplicidade do algoritmo de controle (linear) e dos equipamentos utilizados, quando comparados a outros sistemas encontrados na literatura, o sistema proposto apresentou boa repetitividade e qualidade nas soldas depositadas.

Com relação à investigação do efeito dos parâmetros de soldagem no funcionamento do sistema, foi possível concluir que:

- Quanto menor for o valor da velocidade de soldagem, maior será a influência da poça metálica no comportamento do arco voltaico, resultando na diminuição da sensibilidade do sistema;
- O número total de correções efetuadas ao longo da junta dependerá diretamente da velocidade de soldagem e da frequência de tecimento. Assim, se a velocidade de soldagem for alta e a frequência de tecimento for baixa, para um certo ângulo de desvio, o número total de correções pode não ser suficiente para manter a tocha alinhada ao centro da junta;
- Tanto para velocidades de soldagem altas, como para frequências de tecimento baixas, foram observadas mordeduras nas laterais dos cordões;
- Quanto menor for a amplitude de tecimento, maior será a dificuldade do sistema em reconhecer o desvio da junta. Para as condições ensaiadas, os limites inferiores foram de $A = 6$ mm para o modo de transferência por curto-circuito e $A = 4$ mm para o modo de transferência goticular axial;
- Como a taxa de deposição é maior no modo de transferência goticular axial, o cordão de solda se torna menos sensível às instabilidades ocorridas na trajetória da tocha de soldagem.

No que concerne aos ensaios realizados com o sistema de seguimento de junta comercial, dentro das condições descritas, concluiu-se que:

- O sistema é de difícil implementação e utilização;
- Para que o sistema de seguimento do robô funcionasse satisfatoriamente, foi necessário utilizar uma frequência de tecimento de 3 Hz, para o modo de transferência por curto-circuito, e de 2 Hz para o modo de transferência goticular axial;
- Existe uma tendência do sistema em se tornar mais estável à medida que se aumenta o ângulo de desvio;
- O desvio máximo que o sistema conseguiu corrigir de forma satisfatória foi de 10° para o modo de transferência por curto-circuito e de 5° para o modo de transferência goticular axial.

CAPÍTULO 8 - PROPOSTA PARA NOVOS TRABALHOS

- Analisar a influência do ângulo de chanfro, diâmetro do eletrodo e espessura da chapa no funcionamento do sistema;
- Realizar ensaios com corrente pulsada e suas variações;
- Implementar melhoramentos no algoritmo de controle desenvolvido e testar novos algoritmos de controle;
- Analisar o comportamento do sistema com outros materiais de adição e de base;
- Realizar ensaios em outras posições de soldagem;
- Adaptar o sistema para a soldagem de tubos, onde a deformação sofrida pelas peças é acentuada;
- Utilização do arco TIG como piloto (apenas como sensor) em sistemas Tandem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARY, Howard (1995). **Arc Welding Automation**. 1.ed. New York: Marcel Dekker, Inc. 527p.

COSTA, A.R. e DUTRA, J.C. (2001). Estudio Del Comportamiento de la Corriente de Soldadura em el Proceso MIG/MAG y su Aplicación Sistemas de Seguimiento del Bisel. **Revista Innovacion**. Antofagasta, ano.13, n.2, p.51-58, diciembre.

CULLISON, A. e IRVING, B. (1992). Where in the World is the Weld?. **Welding Journal**. Miami, v.71, n.8, p.45-49, august.

DUTRA, J. C. (1988). Tecnologia da Soldagem. LABSOLDA. **Apostila**. Florianópolis, 1998. 85p.

DUTRA, J. C. (1989). Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG. **Tese de Doutorado**. UFSC, Florianópolis, 151p.

DUTRA, J. C. e ROSA, V. M (1995). O Arco Elétrico como Sensor de Procura de Junta. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 21, Caxias do Sul, 1995. **Anais...** São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora, 1995. 1023p. pp. 807-820.

GOHR JR., R. (1992). Projeto e Realização de uma Fonte de Energia para Soldagem Multi-Processo. **Dissertação de Mestrado**. UFSC, Florianópolis, 160p.

GOHR JR., R. (2002). Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG. **Tese de Doutorado**. UFSC, Florianópolis, 150p.

GULLCO INTERNATIONAL LIMITED (1999). **Product Catalog**. Canadá.

KIM, J.W. e Na, S.J. (1991a). A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-Part1: Modeling of Welding Current in Response to Change of Tip-to-Workpiece Distance. **Proc. Inst. Mech. Engrs**. Part B, vol. 205(B), pp. 59-63.

KIM, J.W. e Na, S.J. (1991b). A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding-Part2: Experimental Modeling of Relationship between welding Current and Tip-to-Workpiece Distance and its Application to Weld Seam Tracking System. **Proc. Inst. Mech. Engrs**. Part B, vol. 205(B), pp. 64-69.

KIM, J.W. e Na, S.J. (1991c). A Study on Arc Sensor Algorithm for Weld Seam Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints. **Proc. Inst. Mech. Engrs**. Part B, vol. 205(B), pp. 64-69.

KIM, J.W. e NA, S.J. (1995). A Study on the Effect of Contact Tube-to-Workpiece Distance on Weld Pool Shape in Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Miami, v.74, n.5, p.141s-152s, maio.

LIN, M. e EAGAR, T. (1985). Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry. **Welding Journal**. Miami, v.64, n.6, p.163s-169s, junho.

LINDEN, G. (1988). Sensors for Seam Tracking and Adaptive Control. **IIW/IIS**. Doc. n. XII-1077-88.

MALIN, V. (1985). Designer' s Guide to Effective Welding AutomationPart 1: Analysis of Welding Operations as Objects for Automation. **Welding Journal**. Miami, v.64, n.11,p.17-27, novembro.

MALIN, V. (1988). Definitions and Classification of Welding Automation and Process Control. **IIW/IIS**. Doc n. XII-1064-88.

METATECH LTDA (2000). Meta Vision System. Disponível em:
<<http://www.metatech.co.uk/hswintro.html#LST>>. Acessado em: 18 de novembro 2000.

NISHIGUCHI, K. et al (1986). A Nonlinear Model of Molten Pool in Arc Welding (em japonês). Japan Welding Society. Japão, v.4, n.4, pp.19-23.

NORRISH, J. (1991), Monitoring and Control of Welding Process, a draft to be published.

TAKEUCHI, N. (1991) Some Kinds of Wire Ground Sensors. **Sensors and Control System in Arc Welding**. Technical Commission on Welding Processes, Japan Welding Society, Japão, p.II-125-128.

ZHANG, S. B. et al (1998), Noncontact Ultrasonic Sensing for Seam Tracking in Arc Welding Processes. **Transaction of the ASME**. EUA, v.120, n.8, p.600-608, agosto.

ANEXO A

Classificação para os métodos de aplicação da soldagem.

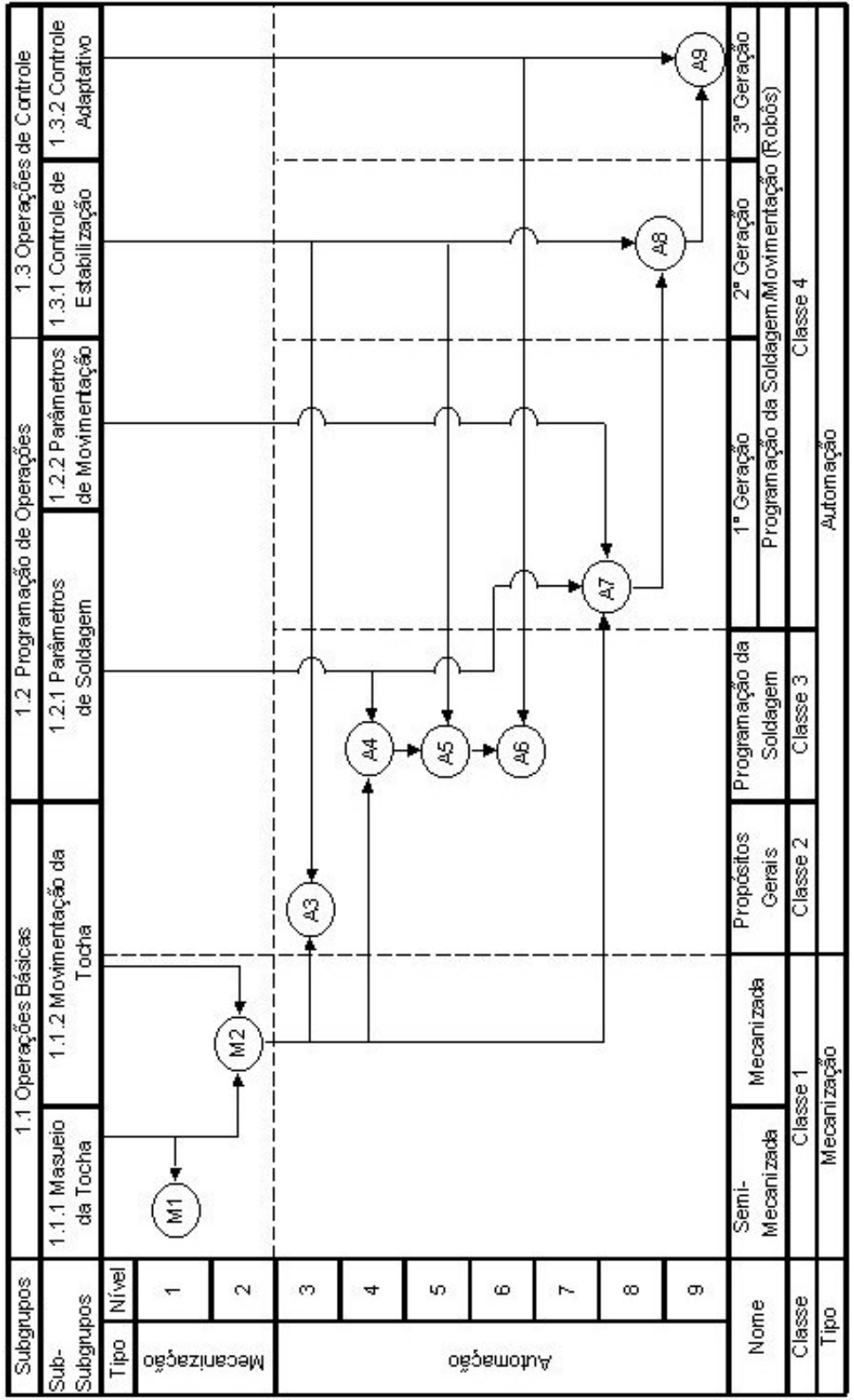


Figura A.1 - Classificação dos níveis de automação da soldagem (adaptado de Malin, 1985).

ANEXO B

Cordões de solda realizados com a amplitude de tecimento ajustada para 4,0 mm no modo de transferência por curto-circuito.

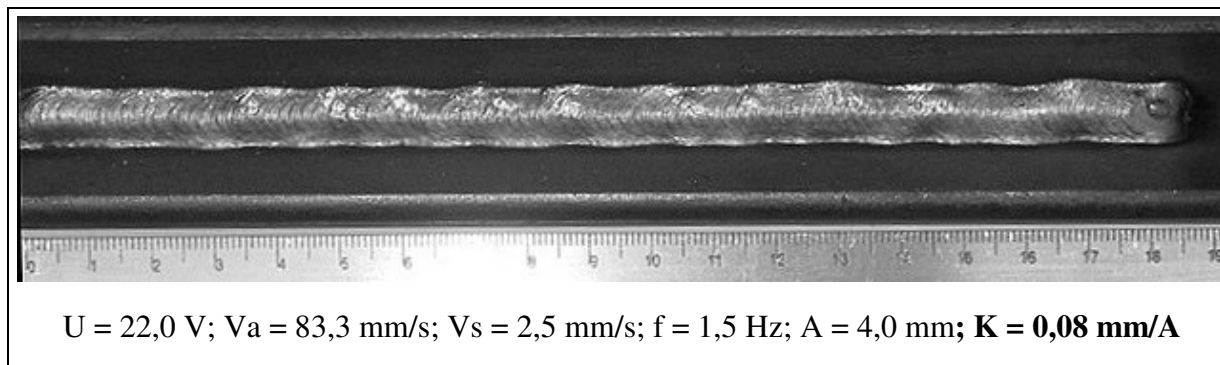


Figura B.1 - Aspecto visual do cordão de solda para o ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,08 \text{ mm/A}$.

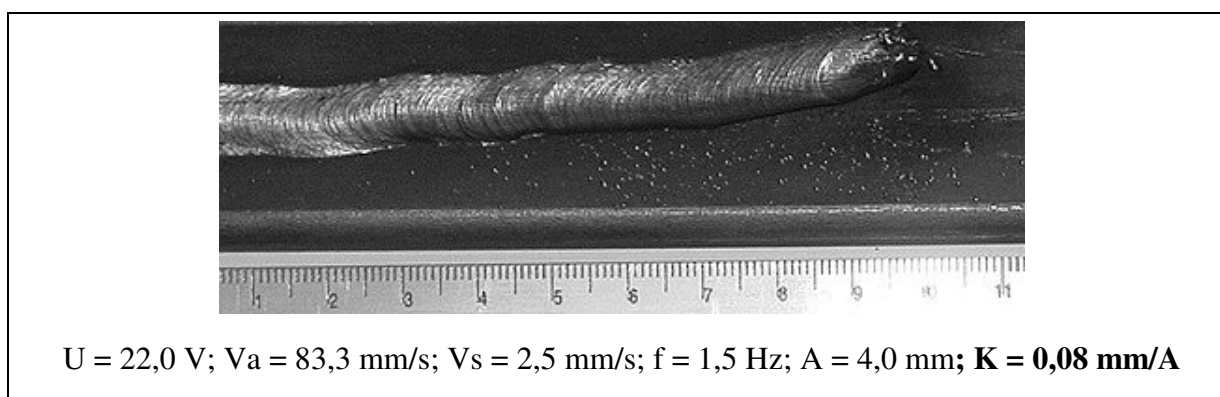


Figura B.2 - Replica do ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,08 \text{ mm/A}$.

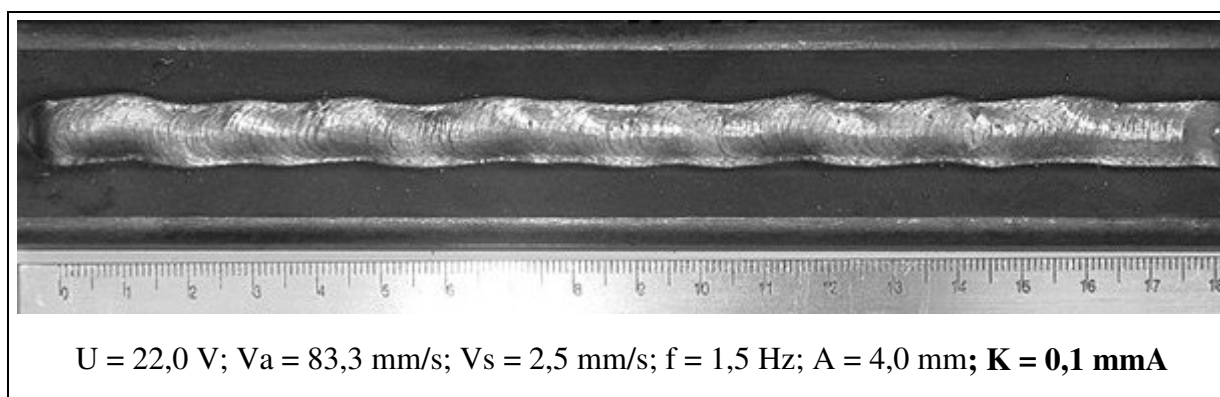


Figura B.3 - Aspecto visual do cordão de solda para o ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,1 \text{ mm/A}$.

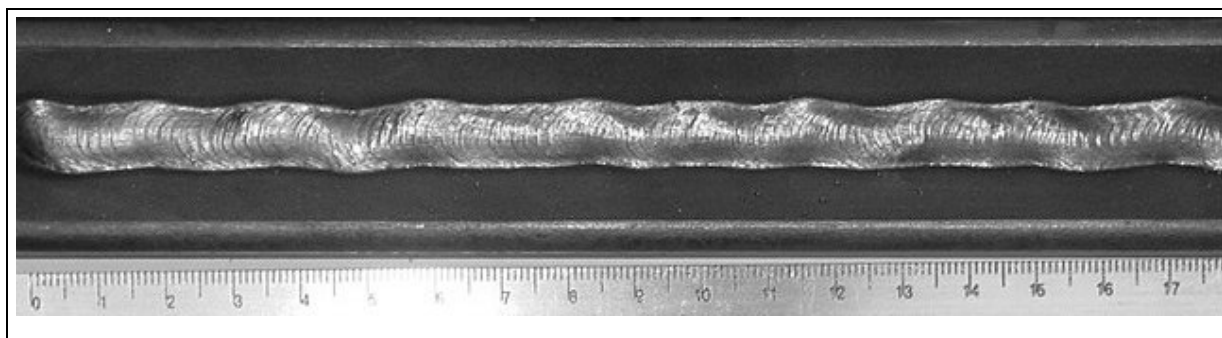


Figura B.4 - Replica do ensaio em que se aplicaram os parâmetros $A = 4 \text{ mm}$ e $K = 0,1 \text{ mm/A}$.

ANEXO C

Cordões de solda realizados na “Bancada de Avaliação” no modo de transferência por curto circuito.

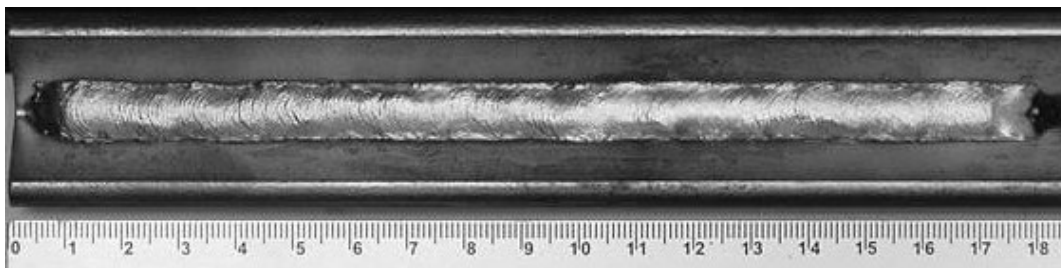


Figura C.1 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP1.

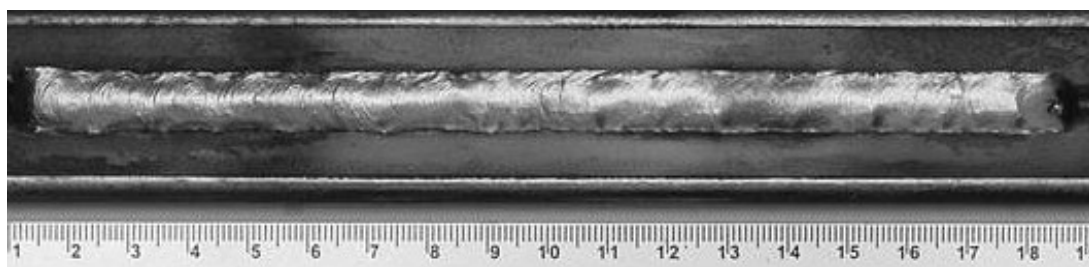


Figura C.2 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP2.

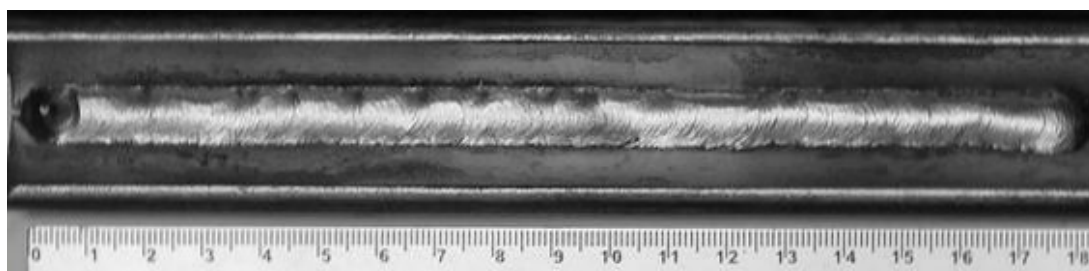


Figura C.3 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP3.

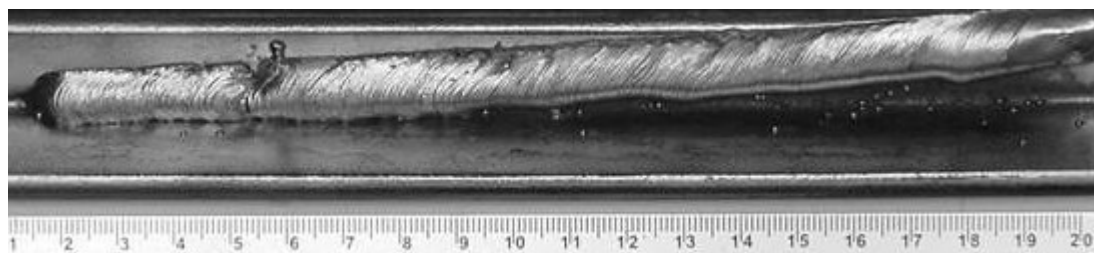


Figura C.4 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP4.

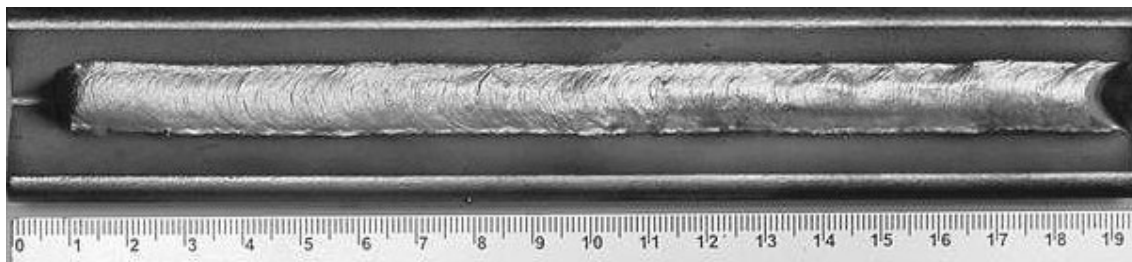


Figura C.5 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP5.

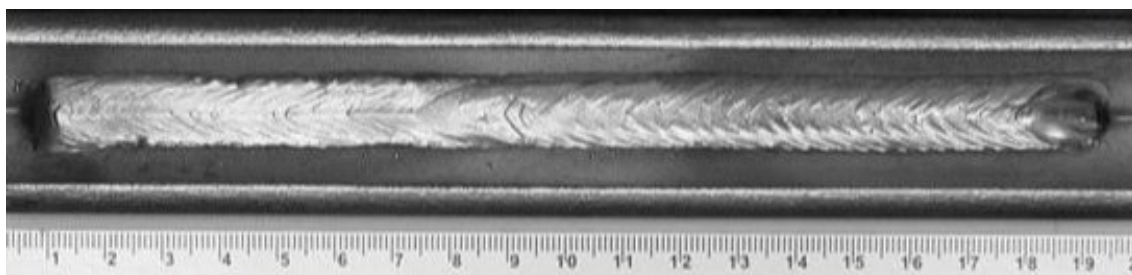


Figura C.6 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP6.

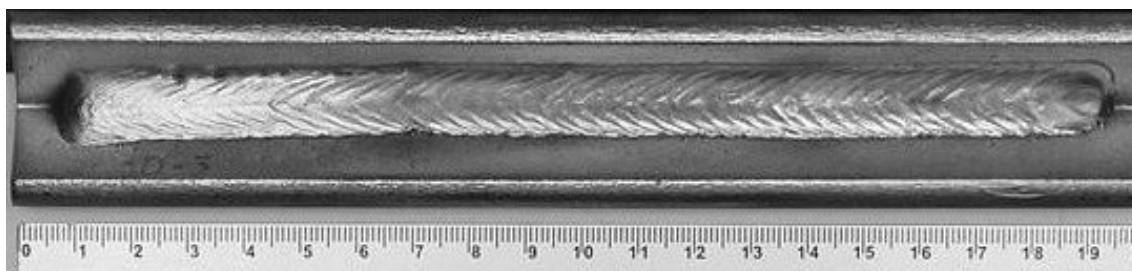


Figura C.7 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP7.



Figura C.8 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP8.

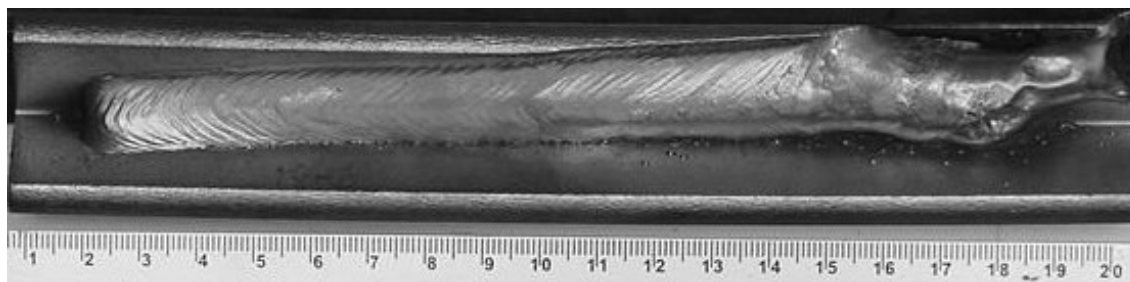


Figura C.9 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP9.

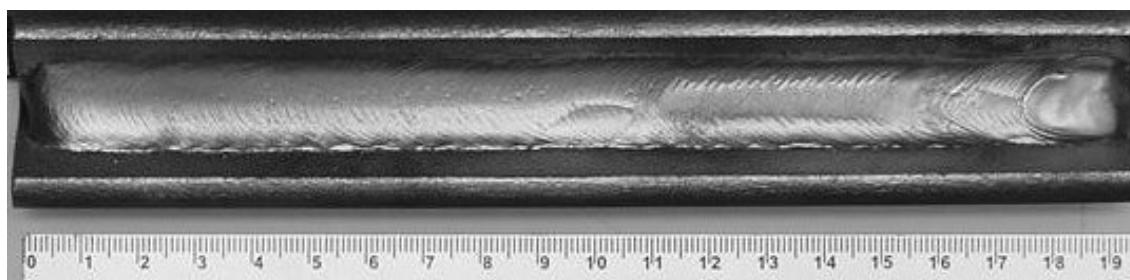


Figura C.10 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP10.

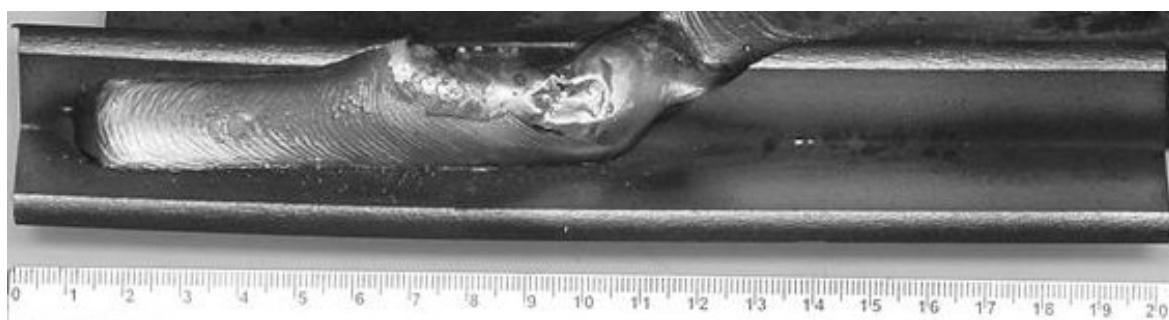


Figura C.11 - Aspecto visual do cordão de solda resultante do ensaio COMP11.